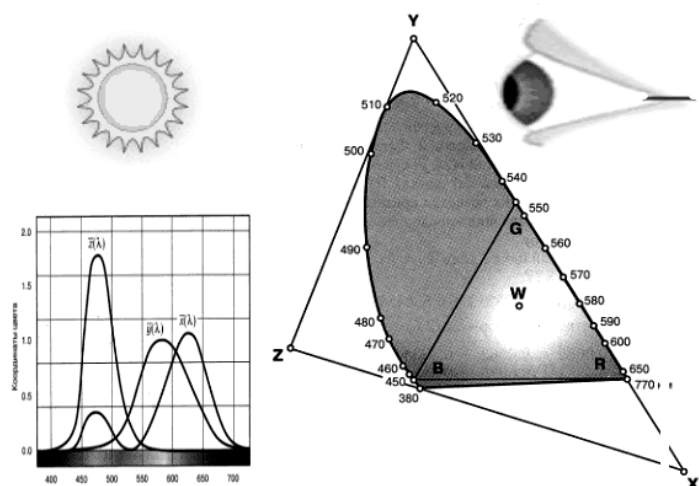


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

С. С. Овчинников,
М. М. Таряник,
О. В. Лутай

Конспект лекцій з курсу Фізіологічна оптика та колориметрія

(для студентів 4 курсу денної і заочної форм навчання за напрямом 0906
(6.050701) “Електротехніка та електротехнології” спеціальності
“Світлотехніка і джерела світла”)



ХАРКІВ
ХНАМГ
2011

Овчинников С. С. Конспект лекцій з курсу «Фізіологічна оптика та колориметрія» (для студентів 4 курсу денної і заочної форм навчання за напрямом 0906 (6.050701) “Електротехніка та електротехнології” спеціальності “Світлотехніка і джерела світла”) / С. С. Овчинников, М. М. Таряник, О. В. Лутай; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х.: ХНАМГ, 2011. – 79 с.

Автори: д.т.н., проф. Овчинников С. С.,
Таряник М. М.,
Лутай О. В.

Рецензент: проф., к.т.н. В. О. Салтиков

Рекомендовано до видання кафедрою “Світлотехніка і джерела світла”,
протокол №7 від 18.05.10

З М І С Т

РОЗДІЛ 1. ФІЗІОЛОГІЧНА ОПТИКА.....	5
1.1. СТРУКТУРА ОРГАНУ ЗОРУ.....	6
Оптична система ока.....	8
Механізм акомодатції.....	8
Розрізняюча сила ока.....	9
М'язовий баланс ока.....	10
Сітчаста оболонка ока.....	11
Жовта пляма.....	14
Обробка і передача інформації в сітчастій оболонці.....	14
Адаптація ока.....	17
1.2. СТАЛИЙ ЗОРОВИЙ ПРОЦЕС.....	18
Характеристики зорового процесу.....	18
Сталі і несталі стани органу зору.....	20
Моделі порогової чутливості.....	21
Методи виміру порогів.....	23
Контрастна чутливість.....	25
Вуалююча роль власного світла сітківки.....	27
Способи регулювання яскравості при вимірі порогів.....	28
Розрізняваність форми і відстані.....	29
Умови виявлення і розрізнення.....	29
Гострота розрізнення та її вимір.....	29
Механізм процесу розрізнення.....	29
Видимість через оптичні прилади.....	31
Гострота стереоскопічного зору.....	34
Стійкість ясного бачення.....	34
Блискість і слепимість.....	35
Показник осліпленості.....	35
Показник дискомфорту.....	39
1.3. НЕСТАЛИЙ ЗОРОВИЙ ПРОЦЕС.....	45

Зорова інерція.....	46
Видимість проблесків.....	46
Послідовні образи.....	48
Стробоскопічний ефект.....	49
РОЗДІЛ 2. КОЛОРИМЕТРІЯ.....	50
Колірна чутливість. Колір і колірність.....	50
Основні кольори.....	52
Аддитивне змішення кольорів. Схеми аддитивного змішення.....	52
Закон Грассмана.....	54
Принципи побудови колориметричних систем.....	55
Міжнародна колориметрична система RGB.....	57
Колориметрична система XYZ.....	58
Колориметрична система ФλР.....	59
Джерела білого кольору.....	59
Фізіологічна колориметрична система КЗС.....	60
Рівноконтрастні колориметричні системи.....	61
Відтворення кольору.....	62
Кольорова фотографія.....	66
Цифрова фотографія.....	66
Оцінка якості відтворення кольору.....	69
Літературні джерела.....	77

РОЗДІЛ 1. ФІЗІОЛОГІЧНА ОПТИКА

Наше життя є невинним процесом прийому, обробки та оцінки інформації, що отримується з довкілля. Одним з цих процесів є сприйняття зорової інформації, яке відбувається за допомогою органу зору.

Центром, який оброблює інформацію, що поступає від органів чуття, служить головний мозок. Мозок людини - орган величиною з два стислі кулаки і вагою від 1300 до 1400 г. Обидві його півкулі покриті тонким шаром сірої речовини, званої корою головного мозку. Сіра речовина містить близько 10 млрд. нервових клітин, або нейронів. Коли ці клітини отримують по нервових волокнах сенсорну інформацію, в мозку виникають відчуття і суб'єктивні "образи" зовнішнього світу.

Організм людини складається з безлічі клітин, і деякі з них - сенсорні (чи рецепторні) - спеціально призначені для отримання інформації з довкілля і передачі її в мозок.

Відчуття, залежно від властивостей матерії, діючої на органи чуття, розділяються на декілька різновидів, з яких зорові відчуття грають важливу роль в спілкуванні людини з природою.

Сигнали, що сприймаються органами чуття ззовні, прийнято називати стимулами, а їх дія - роздратуваннями.

Сенсорні клітини отримують енергію від зовнішніх стимулів і потім перетворюють це роздратування і його варіації в нервові сигнали, які передаються по нервових волокнах в мозок. Нервові волокна та нервові імпульси, що йдуть від сенсорних клітин в мозок, однакові для всіх почуттів і розрізняються між собою тільки тим, що закінчуються в різних відділах кори головного мозку. Тому активність волокон, що несуть сигнали в зорову область потиличної частини мозку, призводить до відчуття світла, а активність волокон, що проводять аналогічні сигнали в слухову область, - до сприйняття звуку.

1.1. СТРУКТУРА ОРГАНУ ЗОРУ

Орган зору в найбільш сприятливих умовах здатний реагувати на декілька десятків фотонів видимого випромінювання, що впало на зіницю ока. Він дозволяє судити не тільки про рівень зорового відчуття - світлоту, але також забезпечує можливість диференціювати колірні відтінки випромінювання, визначувані їх спектральним складом.

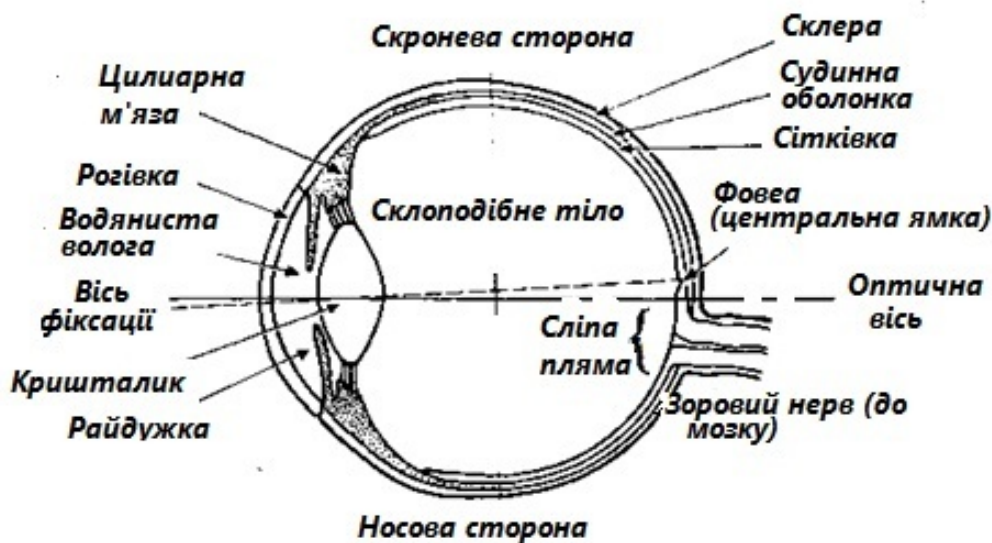


Рис. 1.1 - Горизонтальний розріз правого ока людини

Спереду в ока знаходиться рогівка - прозора оболонка, яка утворює майже сферичну опуклість і займає приблизно 1/6 поверхні ока. По краях рогівка переходить в склеру (білок ока), що покриває іншу поверхню очного яблука. Простір між кришталіком і рогівкою заповнений водянистою вологою, яка складається на 99 % з води і містить солі й білки. Основний внутрішньоочний простір позаду кришталіка зайнятий склоподібним тілом, яке також складається головним чином з води. В очному яблуці немає жорстких частин, і його майже сферична форма з радіусом кривизни близько 12 мм підтримується за рахунок тиску внутрішньої рідини (внутрішньоочного тиску).

Райдужна оболонка є забарвленим волокнистим утворенням з центральним отвором - зіницею. Діаметр зіниці може змінюватися в межах від 2 до 8 мм, регулюючи таким чином кількість світла, що падає на одиницю площі сітківки (освітленість сітківки). Одна з особливостей сітківки - те, що при високій освітленості промені світла, що входять через краї зіниці, менш ефективні для зору, ніж більш центральні промені.

Величина зіниці залежить від багатьох чинників: від освітленості сітківки, висока міра якої викликає звуження зіниці, від зміни фокусу. Крім того, на величину зіниці можуть впливати психологічні і емоційні чинники. Наприклад, при хвилюванні або при появі дуже цікавого зорового стимулу зіниці розширюються. З віком зіниця стає менше і слабкіше реагує на збудження.

Перший етап зорового процесу відбувається в очному яблуці. У сітківці ока та вищих відділах головного мозку витягається за допомогою хімічних і електричних процесів інформація про колір, розміри, рух та інші просторові і часові характеристики зображення; ця інформація, синтезуючись з іншою сенсорною інформацією, що поступає в даний момент або що зберігалася в пам'яті, забезпечує зорове сприйняття.

Орган зору складається з трьох ланок:

- периферичної;
- провідникової;
- центральної.

Периферичною ланкою органу зору є око, що представляє сукупність оптичної і світлосприймаючої систем. Оптична система ока створює зображення зовнішнього простору на сітчастій оболонці. М'язи оптичної системи управляють рухом ока, фокусуванням зображення і регулюванням його освітленості. Світлосприймаючою системою ока є його сітчаста оболонка, заповнена світлочутливими клітинами - зоровими рецепторами. Провідниковою ланкою служить зоровий нерв, за допомогою волокон якого

рецептори з'єднуються з клітинами потиличної частини кори головного мозку, тобто з центральною ланкою органу зору.

Оптична система ока. Розрізнення форми спостережуваного предмета та окремих його деталей забезпечує оптика ока, що фокусує зменшене і зворотне зображення предмета на поверхню сітчастої оболонки. Заломлююча сила оптики ока в основному визначається роговою оболонкою і кришталиком ока. Збільшення заломлюючої сили оптики ока для забезпечення чіткого зображення на сітчастій оболонці близько розташованих предметів - акомодация.

Зредуковане око. При розрахунках зображення прийнято схематизувати оптику ока, замінюючи її однією заломлюючою поверхнею, що розділяє зовнішній простір від склоподібного тіла. Зредуковане око характеризується наступними даними:

- довжина ока, що становить 23,4 мм;
- радіус кривизни заломлюючої поверхні, 6,8 мм;
- радіус кривизни поверхні сітчастої оболонки, 10,2 мм;
- передня фокусна відстань, 17 мм;
- задня фокусна відстань, 23,8 мм.

Механізм акомодатії. Зміна кривизни заломлюючих поверхонь кришталика і переміщення його шарів у процесі акомодатії здійснюється під впливом акомодативної (циліарної) м'язи. При скороченні кільцевих волокон цього м'яза відбувається послаблення натягнення цинкових зв'язок, за допомогою яких кришталик прикріплений по периферії до акомодативної м'язи, і збільшення кривизни кришталика, а також зміна розташування його шарів.

Тривала акомодация на ближню точку призводить до стомлення. Без зайвого стомлення нормальне око може спостерігати предмети, що знаходяться на відстані 0,25 - 0,3 м, - це оптимальна відстань. Як показує досвід, швидкість акомодатії та її глибина залежать від рівня яскравості адаптації, підвищуючись до деякої межі із збільшенням яскравості.

Розрізняюча сила ока. Розрізняючу силу будь-якого приладу, що дає зображення, прийнято характеризувати пороговим кутом δ , тобто кутовим розміром найменшого об'єкту, який ще розрізняється окремо. Чим менше δ , тим більше розрізняюча сила приладу.

Розрізняючу силу ока називають гостротою зору:

$$V = 1/\delta.$$

В офтальмології за нормальну гостроту зору приймають $V = 1$. Визначають гостроту зору за різними тестами. Випробувальна таблиця поміщається на відстані 5 м від пацієнта. Справа в цих таблицях поставлена гострота зору, ліворуч вказані відстані D (у метрах), з яких цей рядок розрізняється при гостроті зору $V = 1$.

$D=50,0$	Ш Б	$V=0,1$	$D=50,0$	Э С	$V=0,1$
$D=25,0$	М Н К	$V=0,2$	$D=25,0$	С О Э	$V=0,2$
$D=16,67$	Ы М Б Ш	$V=0,3$	$D=16,67$	О Э О С	$V=0,3$
$D=12,5$	Б Ы Н К М	$V=0,4$	$D=12,5$	Э О О С О	$V=0,4$
$D=10,0$	И Н Ш М К	$V=0,5$	$D=10,0$	С Э О О Э	$V=0,5$
$D=8,38$	Н Ш Ы И К Б	$V=0,6$	$D=8,38$	О С О Э С О	$V=0,6$
$D=7,14$	Ш И Н Б К Ы	$V=0,7$	$D=7,14$	Э О Э С О Э	$V=0,7$
$D=6,25$	К Н Ш М Ы Б И	$V=0,8$	$D=6,25$	С Э О О С О С	$V=0,8$
$D=5,55$	Б Н Ш М И Ы Н	$V=0,9$	$D=5,55$	О О Э С О Э О	$V=0,9$
$D=5,0$	Н К И Ы М Ш Ы Б	$V=1,0$	$D=5,0$	С Э О Э О С О Э	$V=1,0$
$D=3,33$	Ш И Н К И Ы Б	$V=1,5$	$D=3,33$	Э О О С О Э О	$V=1,5$
$D=2,5$	И Ш И И Ы К	$V=2,0$	$D=2,5$	О Э О С Э О С	$V=2,0$

Рис. 1.2 - Таблиця Головіна – Сивкова

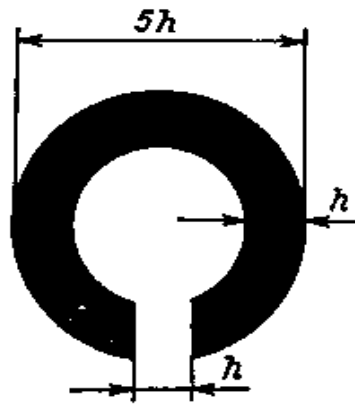


Рис.1.3-Кільце Ландольта

М'язовий баланс ока. Для підвищення можливості орієнтації в навколишньому просторі, а також для забезпечення спільної узгодженої роботи правого і лівого ока, очні яблука можуть здійснювати обертальні рухи навколо центрів, що лежать в середині кожного ока.

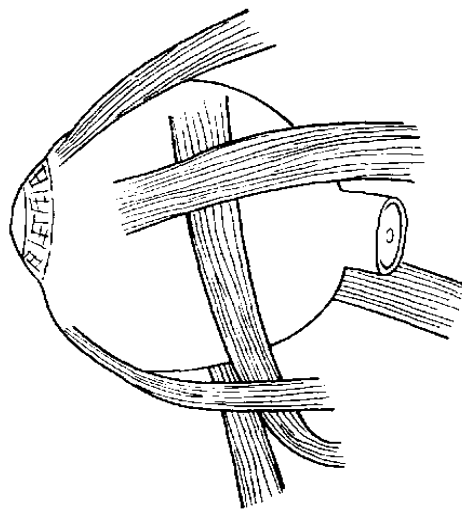


Рис. 1.4 - Вигляд правого ока згори: видно шість м'язів, контролюючих положення очного яблука.

Рухи ока бувають довільні, які виникають в результаті сигналів, що поступають з центру, а також мимовільні. Мимовільними рухами ока прийнято називати систематичні невеликі зміщення зображення на сітківці при уявній постійності фіксації об'єкта спостереження. Мимовільні рухи ока можуть мати амплітуду до 20-40 кутових секунд.

Найбільший інтерес становлять рухи, що забезпечують зведення і розведення вісей двох очей, і називаються конвергенцією і дивергенцією. Конвергенція і дивергенція забезпечують роботу правого і лівого ока при спостереженні предметів, видалених на різні відстані. Очі спостерігача конвергирують при переведенні погляду на ближчі предмети, а дивергирують - на більш видалених. Дивергенція і конвергенція здійснюються за допомогою прямих внутрішніх і зовнішніх м'язів.

Конвергенція і акомодация викликаються однією причиною - наближенням предмета, внаслідок чого вони взаємозв'язані. При бінокулярному спостереженні цю відповідність станів акомодации і конвергенції прийнято називати м'язовим балансом ока. Вивчення динаміки м'язового балансу дозволяє контролювати стомлення організму, що виникає в результаті напруженої зорової роботи.

Сітчаста оболонка ока. Фоторецепція, тобто сприйняття світла і переробка його енергії в інші види - хімічну і електричну відбувається в сітківці. Вона складається з переплетення волокон зорового нерва, що закінчуються світлочутливими клітинами двох різновидів: паличками та колбочками. Сітківка людини містить близько 130 млн. паличок і 7 млн. колбочок, а волокон зорового нерва відходить тільки близько мільйона. Групи рецепторів у сітківці об'єднуються в рецепторні поля, посилаючи один загальний сигнал по волокну зорового нерва. Чутливість паличок приблизно на три порядки вище чутливості колбочок. Палички є апаратом нічного бачення, колбочки - денного. Палички дуже чутливі до світла, але не розрізняють кольорів. Колірний зір забезпечують колбочки. Будова сітківки складна та являє собою складну багат шарову структуру, товщиною близько 0,2 мм. Схематично сітківку можна розділити на два основні шари: світлочутливий, звернутий до судинної оболонки ока, і мозковий, звернутий до склоподібного тіла очного яблука.

Світлочутливі клітини сполучені з корою головного мозку нервовими волокнами. Місце входу зорового нерва, який складається з окремих нервових волокон, в сітчасту оболонку позбавлене світлочутливих клітин, внаслідок чого в цій зоні сітківка нечутлива до світла. Це місце називається сліпою плямою. Воно має розміри по горизонталі близько 6° і по вертикалі близько 8° . Волокна зорового нерва в сітчастій оболонці розділяються на три послідовно зв'язаних нейрона. Суміжні, послідовно розташовані нейрони пов'язані через синапси (області зіткнення і розгалуження відростків нервових клітин), що забезпечують односторонню провідність сигналів від світлочутливих клітин до кори головного мозку і можливість суммації збуджень. Початковими ланками зорових відчуттів є дисоціація молекул світлочутливої речовини (фотореагента) в результаті поглинання фотонів і

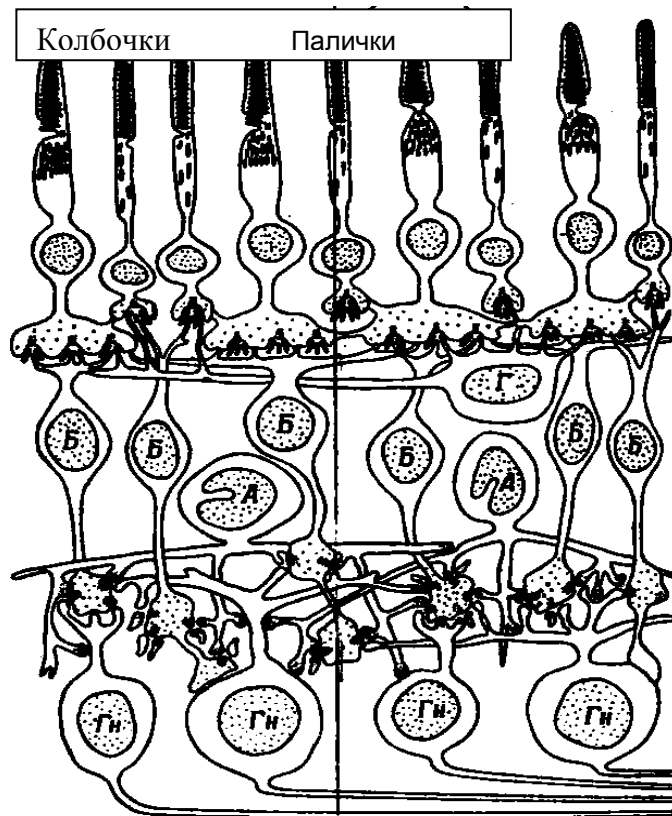


Рис.1.5 - Будова сітчастої оболонки ока:

А- амакринові клітини, В – біполярні клітини, Г- горизонталні клітини, Гн - гангліозні клітини.

виникнення імпульсів струму у волокнах зорового нерва. Дисоціація молекул фотореагента є реакцією зворотною, що забезпечує працездатність ока при будь-якій тривалості дії на нього випромінювання.

Відновник фотореагенту поступає в пігментний епітелій і звідти у світлочутливі клітини у вигляді іонів. Іони відновника негативні, оскільки вони поступають для відновлення позитивних іонів продуктів розпаду фотореагенту. Негативний електронний заряд, що створюється іонами відновника в пігменті епітеліального шару, примушує переміщатися позитивні іони продуктів розпаду фотореагенту до зовнішнього членика світлочутливого елемента. Негативні іони продуктів розпаду, також взаємодіючи з негативним зарядом епітелію, переміщаються до внутрішнього членика світлочутливого елемента і далі - до першого синапсу волокна зорового нерва. Негативні іони поступають до першого синапсу не тільки під дією випромінювання. Навіть у повній темряві виникає деяке дуже слабе зорове відчуття, яке називається власним світлом сітківки ока.

Це явище пояснюється тим, що молекули фотореагенту можуть диссоціювати в результаті зіткнення з іншими молекулами в тих випадках, коли їх швидкість значно перевищує середню швидкість теплового руху.

Концентрація негативних іонів у перших синапсах волокон зорового нерва створює різницю потенціалів між сітчастою оболонкою ока і корою головного мозку. В результаті цієї різниці потенціалів у волокнах зорового нерва виникають імпульси електричного струму.

Кожен імпульс струму, що виникає в нервовому волокні, є затухаючим електричним розрядом. Виникненню одного імпульса струму у волокні зорового нерва, що викликає відчуття короткочасного спалаху світла, відповідає концентрація в першому синапсі цього волокна декількох іонів.

Імпульси струму дії виникають періодично протягом усього часу поглинання випромінювання молекулами фотореагенту. Частота імпульсів у кожному волокні зорового нерва залежить від числа негативних іонів, що поступають в одиницю часу до першого синапсу цього волокна. Отже,

частота імпульсів струму дії визначається освітленістю сітчастої оболонки ока і концентрацією молекул фотореагенту. Таким чином, рівень зорового відчуття, залежний від частоти імпульсів струму дії, визначається яскравістю поверхні даного предмета і концентрацією молекул фотореагенту в сітчастій оболонці.

Жовта пляма. Центральну частину сітківки називають макулярною областю або просто макулою (у переведенні з латів. *macula* - пляма). Присутність макулярного пігменту надає макулі жовтуватий колір, що пояснює її назву - жовта пляма.

Жовта пляма має овальну форму, вона дещо витягнута в горизонтальному напрямі. Розмір її точно не встановлений. В її середині розташована центральна ямка, або фовеа.

В центральній ямці, в безпосередній близькості до точки фіксації - точки, через яку проходить зорова вісь, - тісно притиснуті один до одного тільки колби, палички відсутні. Колби тут особливо тонкі. Мабуть, кожна фовеальна колба через біполярну клітину пов'язана зі своїм волокном зорового нерва, яке передає в мозок тільки її сигнали. Такий пристрій фовеа забезпечує високу роздільну здатність центральної ямки. Периферичні колби рази в три товще фовеальних і вже не мають індивідуального представництва в мозку, так само як і палички.

Обробка і передача інформації в сітчастій оболонці. Сітківка людини інвертована, тобто рецепторні клітини знаходяться біля її задньої поверхні. Світло, що падає, проходить через різні шари сітківки, які прозорі, і поглинається в зовнішніх сегментах рецепторних клітин, де знаходиться зоровий пігмент. Велика частина світла, не поглинутого рецепторами, йде в чорний пігментний епітелій, який, таким чином, зменшує перешкоди від розсіяного світла. Ймовірно, головна роль пігментного епітелію в зоровому процесі - це його участь в регенерації пігменту рецепторів.

Від рецепторів зорова інформація передається до біполярних і гангліозних клітин, а від них - в зорову область кори головного мозку.

Більшість відомостей, які ми маємо в розпорядженні, отримана при вивченні сітківки земноводних і риб, з яких багато хто має хороший колірний зір.

Методи, що дозволили отримати найбільш чіткі результати при дослідженні передачі зорової інформації, включали введення мікроелектродів в різні ділянки зорового шляху і реєстрацію електронних реакцій як поблизу нейронів області, що вивчалася, так і в самих цих нейтронах. Мікроелектроди є тонкими голкоподібними електродами з кінчиком завтовшки менше 0,1 мкм.

Біполярні клітини певною мірою служать просто передавачами сигналів від рецепторів. Ймовірно, створюється можливість збору інформації з досить великої ділянки сітківки, а не з одного рецептора.

Горизонтальні клітини можуть виконувати дві функції. По-перше, вони можуть передавати інформацію від рецепторів біполярним клітинам, що не мають прямого зв'язку з цими рецепторами. По-друге, горизонтальні клітини можуть передавати дію однієї рецепторної клітини на іншу, гальмуючи або послабляючи реакцію останньої на освітлення.

Біполярні клітини передають сигнали як амакріновим, так і гангліозним клітинам.

В окремій гангліозній клітині відбувається сумація електронних реакцій рецепторів. Про цю сумацію говорять дані анатомічного вивчення сітківки: близько 7 млн. колб і 130 млн. паличок, тоді як в зоровому нерві менше 1 млн. волокон. Тому можна вважати, що деякі реакції гангліозних клітин відображають збудження декількох сотень або ще більшого числа рецепторів. Не дивно, що зустрічаються гангліозні клітини, які відповідають на роздратування будь-якої ділянки великої області сітківки. Область, роздратування якої (в будь-якій її ділянці) призводить до реакції у відповідь цієї клітини - рецептивне поле клітини. Значна модифікація нервових сигналів відбувається вже в сітківці, тобто до того, як сигнал буде переданий у вищі відділи мозку.

Світловий стимул невеликого розміру, що падає на сітківку в центральній області (Ц), збуджуватиме гангліозну клітину, тобто частота потенціалів дії підвищуватиметься при включенні світла. Якщо пересунути світловий стимул з центру до периферії (П), реакція знижуватиметься або ж виникатиме при виключенні подразника. Найбільше збудження спостерігається при стимуляції однієї тільки центральної області, а найбільше гальмування - при освітленні периферичної області. Міра збудження в першому випадку і гальмування в другому зростає з рівнем освітленості. Деякі гангліозні клітини реагують протилежним чином - стимуляція центральної області стимулює гальмування, а периферичної - збудження.

Таким чином, процеси виникнення, розвитку і загасання зорового відчуття, характеризуючи ті випромінювання, що поступили в око ззовні, визначаються не лише характеристиками освітлення, але так само і станом органу зору, визначуваним чутливістю периферії (сітчастої оболонки), шляхів, що проводять (волокна зорового нерва), і центрів (кора головного мозку).

Роль паличок і колбочок у створенні зорового відчуття неоднакова при різних яскравості адаптації. Це пов'язано з тим, що, не зважаючи на те, що чутливість паличок (родопсину) більша, ніж колбочок (іодопсину), швидкість регенерації молекул родопсину значно більше швидкості регенерації молекул іодопсина. Внаслідок цього, тривала дія на око випромінювання з яскравістю $L \geq 10$ кд/м² призводить до різкого зниження концентрації молекул родопсину і значного зниження ролі паличок в зоровому процесі. Помітна роль колбочок у зоровому процесі позначається лише при яскравостях $L \geq 0,1$ кд/м². Різні діапазони яскравості, в яких переважно працюють палички і колбочки, визначають їх відмінність по чутливості, яка в паличкового апарату на 2-3 порядку вище за чутливість колбочкового апарату, а також за здатністю розрізняти деталі в умовах денного зору, в сотні разів дрібніші, ніж в умовах паличкового зору. Значно більша роздільна здатність колбочкового

зору в порівнянні з паличковим визначається головним чином значно меншими розмірами рецепторних полів паличкового світлосприймаючого апарату, особливо в центральній частині сітківки.

Адаптація ока. Адаптація ока - це зміна чутливості зорового аналізатора при зміні яскравості поля спостереження.

Чутливість ока змінюється на багато порядків, що забезпечує можливість сприйняття об'єктів з яскравістю від 10^{-6} до 10^5 кд/м².

Зміна чутливості відбувається за рахунок наступних процесів:

- зміни діаметра зіниці ока;
- зміни концентрації світлочутливої речовини в колбах і паличках;
- за рахунок дрейфу зерен чорного пігменту у бік світлочутливих елементів і часткового або повного перекриття паличок, як наслідок відбувається перехід механізму сприйняття від паличок до колб;
- за рахунок зміни чутливості проміжних шарів клітин при зміні частоти імпульсів струму дії;
- зміни чутливості ЦНС.

Розрізняють темнову і світлову адаптацію ока. Темнова адаптація відбувається при переході від великих яскравостей до малих. Процес темної адаптації супроводжується зростанням світлової чутливості ока. Чутливість ока визначається тим мінімальним світловим потоком, який викликає зорове відчуття (відчуття світлоти). При темновій адаптації, через 50-60 хвилин перебування в темряві, чутливість ока досягає максимального значення. Процес темної адаптації протікає тим довше, чим вище яскравість поля зору до начала адаптації.

Світлова адаптація - це процес зменшення чутливості ока при підвищенні яскравості поля зору. Цей процес закінчується тоді, коли настає рівновага між кількістю світлочутливої речовини, що розклалась і відновленої в одиницю часу світлочутливої речовини (фотореагента) в колбочковому апараті ока. При світловій адаптації ока вже через 9-10 хвилин зниження чутливості ока припиняється.

1.2. СТАЛИЙ ЗОРОВИЙ ПРОЦЕС

Характеристики зорового процесу. Для того, щоб охарактеризувати усебічно роботу органу зору, був введений ряд параметрів.

Найбільший інтерес представляє відносна спектральна чутливість органу зору, визначувана відношенням енергетичних яскравістей двох монохроматичних випромінювань (відповідно з $\lambda = 555$ нм і з довжиною хвилі досліджуваного випромінювання), що забезпечують однакову світлоту:

$$V(\lambda) = L_{e\lambda=555} / L_e(\lambda).$$

Це відношення покладене в основу усіх методів виміру спектральної чутливості органу зору.

Не менш важливою характеристикою органу зору є його інтегральна світлова чутливість. Відчуття світлоти випромінюючої поверхні визначається її яскравістю у напрямку до вхідної зіниці ока спостерігача. Ця властивість дозволяє використовувати яскравість для визначення світлового порогу і світлової чутливості. Пороговою яскравістю (світловим порогом) називається мінімальна яскравість світлової плями, яка забезпечує можливість вперше виявити із заданою вірогідністю цю пляму на фоні з яскравістю, яка практично дорівнює нулю. Величина, зворотна пороговій яскравості світлової плями з кутовим розміром $\alpha \geq 50^\circ$ (абсолютний світловий поріг) визначає абсолютну світлову чутливість органу зору.³ З визначення виходить, що вимір абсолютної світлової чутливості органу зору зводиться до виміру порогової яскравості плями з кутовим розміром $\alpha \geq 50^\circ$, званої абсолютним світловим порогом. Дія на око точкових випромінювачів оцінюється по освітленості на зіниці, яку прийнято називати блиском. Світловий поріг точкових випромінювачів з кутовим розміром $\alpha \leq 15'$ прийнято характеризувати пороговою освітленістю зіниці спостерігача, що створюється точковим джерелом світла, яке вперше виявляється із заданою вірогідністю на фоні з яскравістю, близькою до нуля. Порогову освітленість зіниці спостерігача прийнято називати пороговим блиском точкового джерела світла.

Для можливості розпізнавання предметів, зображення яких падає на сітчасту оболонку ока, а також визначення їх взаємного розташування, орган зору повинен виявляти відмінність яскравості й колірності суміжних ділянок поля зору, а також розрізняти окремі деталі предмета, що визначають його форму, і встановлювати різницю відстаней між двома суміжними предметами.

Для характеристики зорового виявлення об'єкта ввели поняття порогової різниці яскравості, яка визначається мінімальною різницею яскравості двох суміжних ділянок поля зору спостерігача, що забезпечує в умовах оптичного контакту виявлення нерівності яскравістей із заданою вірогідністю. Пороговий контраст яскравості об'єкта спостереження з фоном визначається відношенням порогової різниці яскравості $\Delta L_{\text{пор}}$ до яскравості фону $L_{\text{ф}}$:

$$K_{\text{пор}} = \Delta L_{\text{пор}} / L_{\text{ф}}.$$

Величину, зворотну мінімальному пороговому контрасту яскравості, називають контрастною чутливістю. Вона характеризує здатність органу зору виявляти малі відмінності яскравості із заданою вірогідністю:

$$S_{\text{к}} = 1 / K_{\text{пор}}.$$

Здатність органу зору розрізняти форму предмета або його деталей, названа гостротою розрізнення, буде:

$$S_{\alpha} = 1 / \alpha_{\text{пор}},$$

де $\alpha_{\text{пор}}$ - мінімальний кут, що розрізняється.

Здатність зорового пізнання колірності прийнято характеризувати порогом коліровідчуття, що для точкових випромінювачів визначається мінімальною освітленістю зіниці ока, при якій спостерігач пізнає із заданою вірогідністю колірність випромінювання на фоні з яскравістю, практично рівною нулю.

Для тест-об'єктів кінцевих розмірів поріг коліровідчуття визначається яскравістю, що забезпечує заданий рівень вірогідності пізнання колірності.

Здатність розрізнення колірних відтінків двох суміжних ділянок поля зору характеризується кольоророзрізняльною чутливістю органів зору, яка

визначається величиною, зворотною порогу кольоророзрізнення (колірному порогу).

Для характеристики точності зорового виявлення різновіддаленості двох предметів, спостережуваних бінокулярно, користуються поняттям порогу глибинного (стереоскопічного) зору:

$$S_{\delta} = 1 / \delta_{\text{пор.}}$$

Для оцінки швидкості реакції органу зору ввели поняття швидкості розрізнення, яка визначається величиною, зворотною мінімальному часу розрізнення форми предмета або його деталей.

Усі перераховані характеристики призначені для оцінки основних функцій діяльності органу зору, внаслідок чого є основними функціями зору.

Сталі й несталі стани органу зору. Перетворення випромінювання в зорове відчуття - складний процес, що складається з ряду етапів, кожен з яких має кінцеву тривалість.

Інерційність органу зору в усіх його ланках призводить до деякого запізнювання виникнення відчуття, поступового його розвитку і загасання. Тривалість проміжку часу від початку дії випромінювання до моменту виникнення зорового відчуття - латентний період - залежить від рівня збудження органу зору, отже від яскравості випромінювання. Рівень збудження також визначає тривалість та хід згасання зорового відчуття після припинення дії випромінювання на око. Таким чином, тимчасові характеристики зорового процесу визначаються не тільки кінцевою тривалістю усіх ланок перетворення і ходом їх розвитку в часі, але також і зміною чутливості органу зору при переході з одного рівня збудження на інший.

Сталий зоровий процес, що характеризується відповідністю яскравості адаптації $L_{\text{ад}}$ і відчуття світлоти $V_{\text{ад}}$, що викликається нею, визначається повним завершенням усіх трьох різновидів перехідних процесів. Несталий зоровий процес визначається змінним співвідношенням яскравості і світлоти внаслідок безперервних змін фаз перехідних процесів зорового відчуття.

Моделі порогової чутливості.

Високопорогова модель Блекуелла виходить з уявлення про поріг як про деяку критичну точку в ряді безлічі значень стимулу, в якій стимул викликає відчуття. В експерименті спостерігаються випадки, коли спостерігач і за відсутності стимулу (порожня проба) n дає позитивну відповідь Y - реакція помилкової тривоги, вірогідність її появи $P(Y/n)$.

Згідно з теорією Блекуелла, вірогідність позитивних відповідей $P(Y/s)$ при пред'явленні сигналу (стимулу) s складатиметься з істинної вірогідності виявлення, вільного від вгадування і вірогідності успішного вгадування:

$$P(Y/s) = P_{\text{и}} + P(Y/n)[1 - P_{\text{и}}], \quad (1.1)$$

де Y - реакція помилкової тривоги; за відсутності стимулу - Y/n .

З (1.1) істинна вірогідність виявлення стимулу буде:

$P_{\text{и}} = P(Y/s) - P(Y/n)/[1 - P(Y/n)]$ - формула відправки на випадковий успіх.

Далі будується залежність P (вірогідність позитивних відповідей) від s (стимулу). Поріг визначається для заданої вірогідності виявлення з урахуванням поправки на випадковий успіх значенням стимулу, відповідного цій вірогідності.

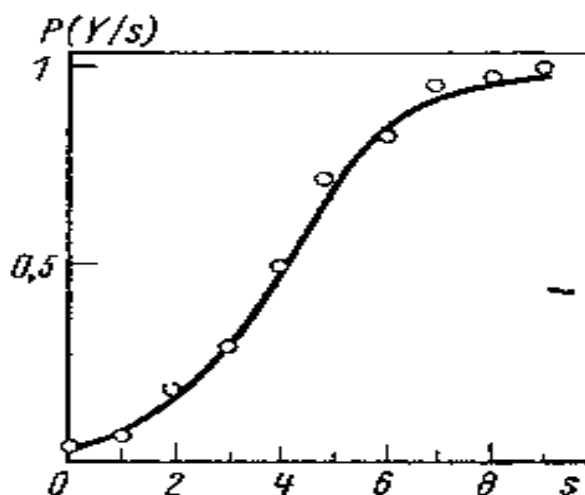


Рис. 1.6 - Залежність вірогідності позитивної відповіді $P(Y/s)$ від значення діючого стимулу s

Модель, заснована на теорії виявлення сигналу. Теорія виходить з того, що сигнал завжди спостерігається на фоні шуму. Стосовно органів зору це означає, що виявлення сигналу (стимулу), обумовлено двома чинниками: законом розподілу реакцій органу зору, викликаних спонтанною активністю нервової системи і флюктуаціями сигналу (шумом), з одного боку, і законом розподілу реакцій, викликаних спільною дією сигналу і шуму, з іншою.

Функція $f_n(x/n)$ описує закон розподілу в разі дії тільки шуму, а $f_{sn}(x/s)$ - коли розбавляється сигнал S . Обидві криві однакові за формою, але зміщені по осі S одна відносно одної.

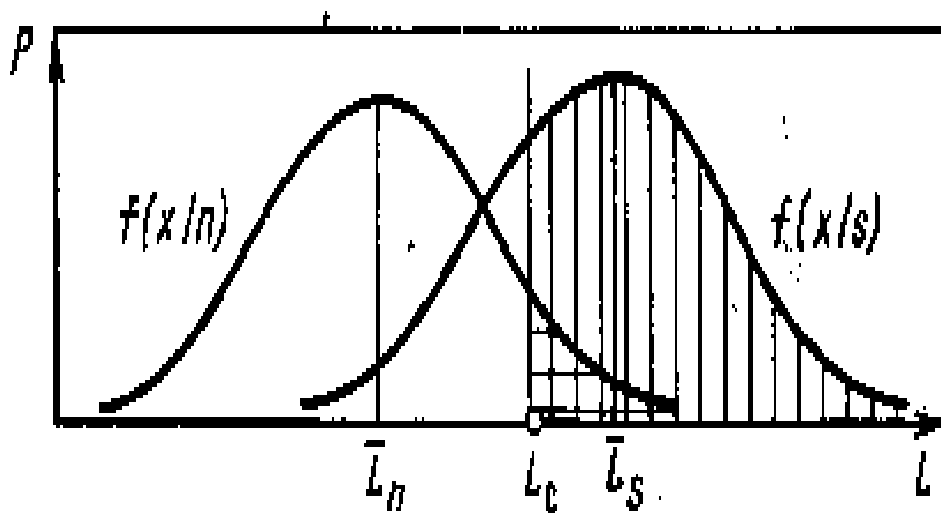


Рис 1.7 - Модель виділення сигналу з сенсорного шуму

L_c - критичне значення яскравості сигналу, яке встановлює для себе спостерігач для того, щоб вирішити, до якого розподілу слід віднести виникле відчуття - до суміші сигналу з шумом або до одного фонового шуму.

Результати виявлення графічно представляють у вигляді залежності вірогідності виявлення сигналу $P(Y/S)$ від вірогідності помилкових тривог $P(Y/n)$. Такий графік несе уся інформацію про приймач. Ця залежність називається робочою характеристикою приймача (РХП).

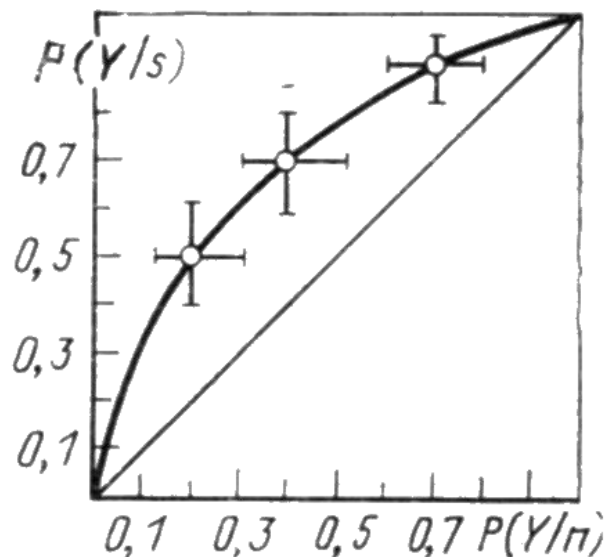


Рис. 1.10 - Побудова робочої характеристики приймача

Низькопорогова модель двох станів Люса. Теорія Люса побудована з припущення про існування критичної точки на осі стимулів, вище за яку спостерігач виявляє сигнал, а нижче за яку виявлення відсутнє. Передбачається, що за відсутності сигналу існує деяка вірогідність позитивної відповіді. В процесі виявлення спостерігач може вгадувати результат. Вірогідність позитивних відповідей за рахунок дійсного виявлення і вгадування буде:

$$P(Y/S) = q_s + u(1 - q_s),$$

де q_s - частина сигналів, виявлених спостерігачем;

u - частина випадків, коли спостерігачеві вдалося вгадати наявність сигналу.

$$P(Y/n) = q_n + u(1 - q_n)$$

- сумарна вірогідність помилкових тривог.

Збудження в моделі Люса може мати місце і за відсутності сигналу, тому уникнути помилкових тривог неможливо. Зміна u (показника ризику) в межах від 0 до 1 визначає межі вірогідності виявлення сигналу і помилкових тривог:

$$q_s \leq P(Y/S) \leq 1;$$

$$q_n \leq P(Y/n) \leq 1,$$

$P(Y/S) = P(Y/n) q_s/q_n$ - співвідношення, отримане вирішенням спільно рівнянь.

При мінімальній обережності ($t = 1$) і мінімальному ризику ($u = 0$) спостерігач завжди дає негативну відповідь, якщо немає збудження органу зору, і позитивний, якщо збудження є. У цій точці одна стратегія переходить в іншу.

Методи виміру порогів. Основними методами виміру порогів і сенсорної чутливості є три методи:

1. Метод середньої помилки;
2. Метод порогів (метод мінімальних вимірів);
3. Метод постійних стимулів.

Усі методи засновані на створенні дискретних або безперервних послідовностей стимулів, що пред'являються спостерігачеві, які він повинен ідентифікувати як спостереження, що уперше виявляються в деяких стабільних умовах. Важливим є питання точності, з якою вимірюється стимул, що пред'являється.

Метод середньої помилки. Характерною особливістю цього методу є те, що зміну стимулу тут робить сам випробовуваний, а не експериментатор. Випробовуваному пред'являється деякий стандартний (еталонний) стимул і він повинен, регулюючи другий змінний стимул, відтворити таке його значення, яке з точки випробовуваного дорівнювало б стандартному. При підрівнюванні змінного стимулу він може користуватися різними стратегіями, але в процесі проведення експерименту повинен дотримуватися єдиної стратегії.

Недолік методу: залежність результатів експерименту не тільки від чутливості органу зору, але й від чутливості рухових відчуттів випробовуваного.

Метод порогів. Заснований на пред'явленні випробовуваному послідовного ряду тих, що спочатку збільшуються, а потім дискретних значень змінного стимулу, що зменшуються, які він повинен зіставити із

стандартним. Встановлюється поріг на появу (L_p) і поріг на зникнення (L_n). Визначається помилка, яку допускає випробовуваний в ситуації невизначеності, - помилка звикання.

Значення порогу визначається:

$$L_{\text{пор}} = 0,5 (L_n + L_p).$$

Середнє значення порогу визначається по 10 - 20 серіям вимірів порогів на появу і зникнення. Таким чином, загальне число пред'явлень, що дозволяє з необхідною точністю визначити поріг, складає від 100 до 400 пред'явлень.

Метод постійних стимулів. Особливістю є постійність дискретних значень змінного стимулу, що пред'являється протягом усіх серій дослідження. Сукупність постійних значень стимулу визначається на основі попереднього експерименту і складається зі значень стимулу як вище, так і нижче за його порогове значення. Для дослідження вірогідності помилкових тривог в число ситуацій, що пред'являються, включаються пари, в яких відмінність між стандартним стимулом і порівнюваним свідомо відсутня (порожні проби). Для визначення порогу будують залежність вірогідності виявлення стимулу від його значення. Результати експерименту можуть бути подані у вигляді РХП.

Контрастна чутливість. Зорове виявлення об'єкту спостереження, одноколірного з фоном, можливо, коли різниця яскравості об'єкту і фону рівна або більше порогової різниці яскравості. Відношення різниці яскравості плями (об'єкту) і фону до яскравості фону називається яскравісним контрастом.

$$k = (L_o - L_{\phi}) / L_{\phi} = \Delta L / L_{\phi},$$

де L_o , L_{ϕ} - яскравості об'єкта і фону; ΔL - різниця яскравості об'єкта і фону.

Позитивний контраст мають об'єкти, світліші за фон, а негативний - темніші.

Умови виявлення об'єкта, одноколірного з фоном, виражаються наступними нерівностями:

$$\Delta L \geq \Delta L_{\text{пор}} \quad \text{або} \quad k \geq k_{\text{пор}},$$

де $\Delta L_{\text{пор}}$ і $k_{\text{пор}}$ - порогові значення різниці яскравості і яскравісного контрасту.

Порогова різниця яскравості залежить від кутового розміру об'єкту спостереження і яскравості фону, на яку адаптований спостерігач. За дослідженнями Блекуелла та Зідентопфа було встановлено:

1. Пороговий рівень сталого зорового процесу визначається сукупністю трьох параметрів: яскравості адаптації L_{ϕ} , кутового розміру тест-об'єкта α і його яскравісного контрасту k з фоном, які характеризують порогові умови.

2. Порогова різниця яскравості збільшується із зростанням L_{ϕ} та зі зменшенням кутового розміру тест-об'єкта.

3. Кожному кутовому розміру тест-об'єкта відповідає деяке мінімальне значення порогового контрасту $k_{\text{пор}} = \xi_L$, менше якого тест-об'єкт не може бути виявлений при будь-якому значенні яскравості.

4. Кожному значенню яскравості адаптації відповідає деяке мінімальне значення порогового контрасту $k_{\text{пор}} = \xi_L$, менше якого тест-об'єкт не може бути виявлений при будь-якому як завгодно великому значенні його кутового розміру.

5. Величина, зворотна мініимальному значенню порогового контрасту по яскравості, визначає контрастну чутливість $S_k = 1/\xi_L$, яка росте із збільшенням яскравості адаптації.

6. Максимальне значення контрастної чутливості органу зору визначається приблизно мінімальним пороговим контрастом $\xi_{\alpha L} = \xi_{\min}$ з необмеженим кутовим розміром тест-об'єкта в умовах оптимальної яскравості $L_{\phi} \geq 350 \text{ кд/м}^2$.

7. Будь-якій довільно вибраній парі параметрів з трьох: L_{ϕ} , k і α відповідає деяке значення третього, такого, що визначає пороговий рівень зору.

Зменшення порогової різниці яскравості при збільшенні кутового розміру тест-об'єкта можна пояснити збільшенням числа світлочутливих

клітин в зоні зображення тест-об'єкта. Велику роль кутового розміру тест-об'єкта в умовах малої яскравості $L_{\phi} \leq 0,1$ кд/м² можна пояснити вирішальним значенням паличок в процесі нічного зору і малою концентрацією їх в центральній зоні сітківки.

Вуалююча роль власного світла сітківки. Співвідношення порогової різниці яскравості з яскравістю фону визначається вуалюючою дією (шумовим ефектом) власного світла сітківки. Цей ефект помітний при малих яскравостях адаптації, внаслідок чого в області малих яскравостей фону спостерігається найбільш різке зростання порогового контрасту тест-об'єкта з фоном.

Зменшення сприйманого контрасту за рахунок вуалювання буде тим сильніше, чим більше відносна величина яскравості вуалі β / L_{ϕ} , отже - чим менше яскравість фону L_{ϕ} .

Пороговий контраст тест-об'єкта визначається:

$$k_{\text{пор}} = \xi_L (1 + \beta / L_{\phi}), \quad (1.1.)$$

де ξ_L - мінімальний пороговий контраст при яскравості фону L_{ϕ} .

Для тест-об'єкта будь-якого кутового розміру пороговий контраст визначається у функції яскравості аналогічно.

$$\Delta L = \xi_{\alpha} (\beta + L_{\phi}), \quad (1.2)$$

де ξ_{α} - мінімальний пороговий контраст для об'єкту з кутовим розміром α . Графічна інтерпретація (1.1 і 1.2) в координатній системі ΔL і L_{ϕ} зображується прямою.

Значення порогової різниці яскравості темних тест-об'єктів на світлому фоні $L_{\phi} > L_o$ відрізняється від позитивних значень порогової різниці яскравості при $L_{\phi} < L_o$.

Пороговий контраст об'єкта прямокутної форми обчислюється як середнє геометричне порогових значень контрастів кругів з діаметрами, які дорівнюють сторонам прямокутника:

$$(k_{\text{пор}})_{a, b} = [(k_{\text{пор}})_a (k_{\text{пор}})_b]^{0,5}.$$

Способи регулювання яскравості при вимірі порогів. Регулювання яскравості тест-об'єкта можливо:

- зміною відстані від джерела світла до освітлюваної поверхні теста;
- зміною площі отвору діафрагми, розташованої між поверхнею тесту та джерелом світла великих розмірів (розсіююче скло);
- поляризацією зображення теста;
- зміною середньої (ефективної) яскравості тест-об'єкта, що з'являється у полі зору спостерігача з частотою вище критичної.

Поляризаційний спосіб зміни яскравості тест-об'єкта. Заснований на оптичному поєднанні його зображення з фоном при спостереженні через двозаломлюючу призму і поляроїд.

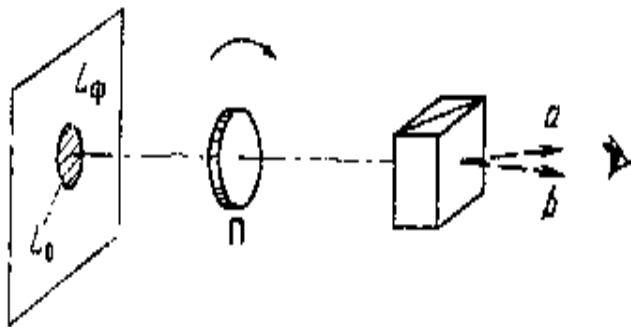


Рис. 1.9 - Схема виміру порогового контрасту

Спостерігач бачить два зображення об'єктів, утворених поляризованими пучками променів a і b . Спостерігаючи ці два поляризовані зображення через поляроїд, можна поворотом поляроїда Π послаблювати одне з них з одночасним посиленням другого. Послаблення першого можна робити до того моменту, коли контраст досягне порогового.

В установках з регулюванням яскравості тест-об'єкта за рахунок зміни відстані до джерела світла і розкриття діафрагми можлива зміна порогової різниці яскравості в умовах як позитивного ($L_0 > L_\phi$), так і негативного ($L_0 < L_\phi$) контрастів.

Гострота розрізнення та її вимір. Здатність ока розрізняти дрібні деталі характеризуються кутом, що розрізняється, і величиною, зворотною цьому куту і називається гостротою розрізнення.

Найбільшу гостроту розрізнення орган зору має в центральній ямці сітківки, де вона досягає $S\alpha = 2,5$ за найбільш сприятливих умов ($L_\phi = 10^4$ кд/м² і $k = 1$). По мірі видалення зображення об'єкта спостереження від центральної ямки гострота розрізнення денного зору різко падає, досягаючи 0,1 максимального значення в зоні близько 20° . Гострота розрізнення в умовах нічного зору дуже невелика, і максимум її не перевищує $S\alpha = 0.05$ в зоні $10-20^\circ$ від центральної ямки сітківки. Ці особливості зору пояснюються максимальною індивідуалізацією зв'язків клітин кори головного мозку з колбами, концентрація яких максимальна в центральній ямці сітківки, і угрупованням по 100-200 паличок на одному волокні зорового нерва.

Тест-об'єктами для виміру кута, що розрізняється, можуть служити різні фігури і букви, зорове визначення форми яких є завданням спостерігача.

Міжнародним тестом є кільце Ландольта, пропорції якого визначаються стандартними співвідношеннями. Для контролю правильності відповіді спостерігачів кільце Ландольта слід показувати з різним напрямом розриву і вимагати відповіді, в яку сторону (вгору, вниз, управо, вліво) він обернений.

Гострота розрізнення неоднакова для об'єктів, що мають різні контрасти. Чим складніше за формою предмет, тим більш високими значеннями параметрів L_ϕ , $\alpha_{\text{пор}}$ і $k_{\text{пор}}$ він повинен володіти для забезпечення необхідної вірогідності його розрізнення.

Максимум гостроти розрізнення в умовах освітлення об'єкта спостереження монохроматичним світлом лежить в області жовтого кольора з довжиною хвилі 560-570 нм. Дослідження Арндта та Дреслера, проведені в умовах денного зору, показали, що в світлі ртутних і натрієвих ламп гострота розрізнення вища, ніж у світлі ламп розжарювання і неонових ламп.

Механізм процесу розрізнення. Усі закономірності зміни гостроти розрізнення можна пояснити дійсним розподілом освітленості сітчастої

оболонки ока в зоні зображення тест-об'єктів. Наявність дифракції та аберації випромінювання тест-об'єкта у вигляді двох точок, що світять, зображення яких розташовані на відстані a один від одного (рис. 1.13), призводить до відмінності рівнів збудження суміжних рецептивних полів на величину, пропорційну різниці освітленостей сітківки в зоні зображення $\Delta E_{\max} = E_{\min}$.

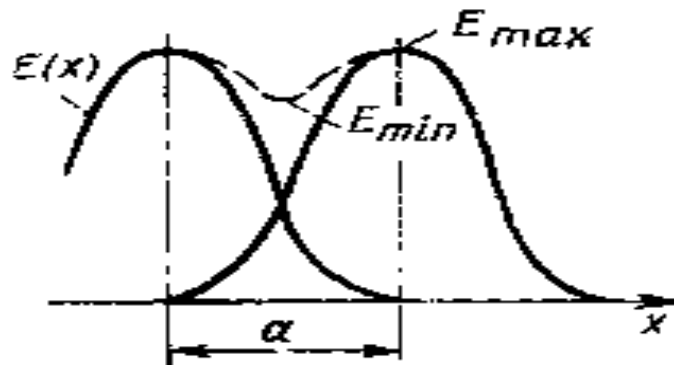


Рис.1.10 - Розподіл освітленості на сітківці при спостереженні двох стимулів

Різниця рівнів збудження стає пороговою при деякому значенні відношення $\Delta E / E_{\phi}$.

При розрізненні розриву між темними смужками на світлому фоні відносна порогова різниця освітленості дорівнює 0,1 - 0,15. Коефіцієнт пропорційності визначається формою кривих розподілу освітленості сітківки і, отже, залежить від розміру вхідної зіниці. Внаслідок того, що із зростанням діаметру зіниці зменшується дифракція і збільшується аберація, існує оптимальне для гостроти розрізнення значення діаметра зіниці, яке дорівнює 3-4 мм.

Теорію механізму гостроти розрізнення прийнято називати дифракційною, оскільки при високих рівнях яскравості ($L \geq 100$ кд/м²) і, отже, малому діаметрі зіниці ока ($d \leq 4$ мм) форма кривої освітленості сітківки в основному визначається дифракцією.

Збільшення довжини межі між тест-об'єктами, які сприймаються окремо, як і збільшення яскравості фону, зменшує пороговий контраст $k_{\text{пор}}$ і, отже, призводить до зростання гостроти розрізнення при заданій формі й контрасті тест-об'єкта з фоном.

Видимість через оптичні прилади. Поліпшення умов видимості об'єкту спостереження можливо шляхом збільшення будь-якого з трьох параметрів зорового процесу: k , $L\phi$, α .

Яскравість фону і контраст об'єкта спостереження з фоном визначаються умовами освітлення, які слід вибирати оптимальними з усіх можливих. За вибраних або заданих умов освітлення можлива варіація тільки кутового розміру об'єкта до ока спостерігача або застосуванням оптичних приладів (луп, мікроскопів, зорових труб, біноклів).

Гострота стереоскопічного зору. Зображення спостережуваного предмета на сітчастих оболонках кожного ока виходять дещо різними. Це явище, назване диспаратністю зображень, неоднаково для різновидалених предметів. Зусилля, що проявляються організмом для кошторисного відчуття цих двох декілька різних зображень, не однакові для різновидалених предметів і дозволяють судити про відстань предмета, що фіксується, від спостерігача. Друга обставина, що дозволяє помічати різновидаленість предметів, є також результатом узгодженої роботи двох очей і полягає в конвергенції їх оптичних осей тим більшою, чим ближче розташований спостережуваний предмет.

Бінокулярний зір, інакше званий стереоскопічним, дозволяє розрізняти форму предмета не тільки за контуром, але також за рельєфом його деталей і є характерною властивістю стереоскопічного зору. Стереоскопічний зір дозволяє виробляти оцінку відстаней і розмірів об'єктів спостереження і, отже, він тривимірний.

Поріг глибинного зору, названий порогом глибини, характеризується мінімальною різницею паралактичних кутів між двома об'єктами

спостереження, що сприймаються з достатньою (заданою) вірогідністю різновидаленими.

Поріг глибини темних об'єктів на світлому фоні зростає до $\delta_{\text{пор}} = 108$ при яскравості $L_{\text{ф}} = 0,01$ кд/м² у порівнянні з $\delta_{\text{пор}} = 12 \div 15$ при яскравості 0,5-5 кд/м². При вимірі порогу глибини білих об'єктів на чорному фоні збільшення яскравості об'єктів понад $L = 8$ кд/м² знову призводить до зростання порогу, отже, до зниження гостроти стереоскопічного зору. На значення порогу глибини великий вплив мають форма об'єктів спостереження та їх контраст з фоном.

Оптичні дефекти ока

Сферична аберація. Сферична лінза має властивість більшого заломлення променів периферичних, ніж центральних. В результаті неоднакового заломлення паралельних променів, що падають на центральну і периферичну зони лінзи, вони фокусуються не в одній точці. Це явище називається сферичною аберацією.

Сферична аберація оптичної системи ока частково компенсується меншим значенням показника заломлення периферичних зон кришталика в порівнянні з його ядром, а також деяким збільшенням в радіусі кривизни периферичної частини рогової оболонки. Незважаючи на це, сферична аберація оптики ока відіграє помітну роль у зоровому процесі, особливо при діаметрі зіниці $> 3 - 4$ мм. Сферична аберація залежить від акомодатії, як правило, збільшуючись зі зростанням напруги акомодатії.

Якщо наблизити текст настільки близько, що ми не можемо чітко розрізняти букви, а потім узяти листок паперу з малим отвором і помістити його перед самим оком, то букви знову зробляться чіткими. При цьому краї зіниці і кришталика вимикаються з роботи. Сферична аберація знижується, і ми бачимо предмет різкіше. При яскравому освітленні діаметр зору знижується і це теж призводить до зниження аберації.

Хроматична аберація. Хроматична аберація, визначувана дисперсією світла очних середовищах, є причиною недосконалості оптичного зображення на сітчастій оболонці ока.

Фокус фіолетових променів розташований на 0,43 мм ближче до кришталіка, ніж фокус червоних променів, якщо око акомодоване на нескінченність. Тому предмети, особливо білі, освітлювані білим світлом, дають зображення на сітківці, оточені кольоровою облямівкою. Зазвичай ми її не помічаємо. Легко помітити наявність хроматичної аберації при розгляді зблизька малюнка у вигляді концентричних кіл. Навколо чорних кілець ми побачимо кольорові облямівки.

Наявність хроматичної аберації виявляється при спостереженні точкового джерела білого світу через пурпурний світлофільтр, який пропускає тільки крайні синьо-фіолетові та червоні промені. За відсутності акомодатії, коли спостережуване джерело знаходиться поблизу далекої точки ясного бачення, спостерігач бачить точку, що світить, червоною з синьо-фіолетовим ореолом. При максимальній напрузі акомодатії точку, що світить, видно синьо-фіолетовою з червоним ореолом.

Як показує досвід, в нормальних умовах око фокусує на сітчасту оболонку жовту частину спектру, внаслідок чого крайні частини спектру - червоно-помаранчева і синьо-зелена - зображуються недостатньо чітко.

За звичайних умов освітлення білим світлом з суцільним спектром ми не помічаємо кольорових кругів світлорозсіювання, які виникають в результаті хроматичної аберації, що пояснюється накладенням кольорових ореолів один на іншій. В результаті цього хроматична аберація, також як і сферична, в основному зводиться до деякої нечіткості зображення. Червоні і фіолетові ореоли, що з'являються на межах зображення, як правило, не видно внаслідок малої видимості крайніх коротко- і довгохвильових випромінювань.

Умови виявлення та розрізнення об'єкту. Величину, зворотну часу спостереження, що забезпечує (при заданій яскравості фону, контрасті об'єкту спостереження з фоном і розмірі об'єкту) необхідну вірогідність

виявлення або розрізнення, прийнято називати швидкістю виявлення або швидкістю розрізнення.

У простому випадку зорове завдання може обмежуватися лише виявленням об'єкта, коли спостерігач визначає, помітний або непомітний об'єкт. Складнішим зоровим завданням є розрізнення деталей і пізнання форми об'єкта, наприклад, пізнання букви, визначення напрямку розриву в кільці Ландольта та ін.

Пороги розрізнення, як правило, вище за пороги виявлення, причому ця відмінність тим більше, чим складніше форма об'єкту.

Обмеження часу спостереження об'єкту, як у фазі виявлення, так і у фазі розрізнення (впізнання) може бути за рахунок:

а) короткочасного (імпульсного) освітлення усього простору, в тому числі і об'єкту;

б) короткочасної появи в полі зору спостерігача об'єкту на фоні постійної за часом яскравості адаптації.

Обидва ці види обмеження часу спостереження призводять до збільшення порогових значень - яскравості фону $L_{\text{ф}}$, контрасту об'єкту спостереження k з фоном, розміру об'єкту.

Зорову працездатність можна визначити добутком швидкості розрізнення на вірогідність правильного пізнання форми тест-об'єкту.

$$\eta = \frac{1}{\tau} \cdot P \ .$$

Стійкість ясного бачення. Це здатність ока тривало зберігати в полі зору фіксовані оком деталі. Якщо око протягом довгого часу фіксує яку-небудь дрібну деталь, то зосереджена увага викликає через короткий час стомлення. Деталь часом видно виразно, а часом розпливчато. Явище це періодично повторюється.

Якщо фіксувати увагу на даній деталі протягом певного проміжку часу (звичайно 3 хвилини), то відношення часу ясного бачення до усього періоду часу служить мірою стійкості ясного бачення.

Блискість та сліпимість. Властивість яскравих поверхонь, що знаходяться в полі зору і викликають в очі неприємне або хворобливе відчуття - блискість. Відповідний стан ока в результаті дії на нього блискості - сліпимість.

Звичайно сліпимість створюється прямими променями ниток ламп розжарювання, частинами поверхні освітлювальних приладів, що мають значну яскравість, а іноді надмірною яскравістю самих робочих поверхонь.

Сліпимість залежить від кута, утвореного напрямом променів джерела до ока з горизонтальною лінією (нормальний напрям зору).

Приблизно можна вважати, що дія блискості обернено пропорційна до квадрата цього кута.

Вплив блискості сильно позначається в зоні від 0 до 14°; в межах від 14 до 27° дія блискості знижується, залишаючись все ж дуже значним. Явище це пояснюється тим, що зображення блискотного джерела падає на сітківку поза найбільш чутливого її місця - жовтої плями, що менш небезпечно в сенсі сліпимості.

При збільшенні яскравості й розміру блискотного джерела дія блискості збільшується. Видалення джерела виконує зворотну дію. При малих і видалених джерелах освітленість сітківки обумовлюється світловим потоком, що вступає в зіницю, а цей світловий потік визначається силою світла і відстанню від джерела до ока. З цієї причини потужні лампи, що створюють зблизька значну сліпимість, вдалині (на відстані декількох сотень метрів) не викликають в очі хворобливого відчуття. Навпаки, прожектори, що мають велику силу світла, викликають значну сліпимість, незважаючи на велику відстань. Слід зазначити, що загальне підвищення освітленості фону, на якому розглядається джерело, збільшує дію блискості цього джерела.

Показник осліпленості. Яскравість окремих ділянок поля зору неоднакова. Розподіл яскравості в межах поля зору визначається не тільки розходженням коефіцієнтів яскравості або коефіцієнтами відображення

окремих ділянок поля зору, але також розподілом світлового потоку по освітлюваних поверхнях і наявністю в полі зору світлових приладів.

Вплив нерівномірного розподілу яскравості позначається на пороговій різниці яскравостей $\Delta L_{\text{пор}}$. За дослідженнями Шельдерупа пороговий контраст яскравості зростає в п'ять разів у результаті дев'ятикратного збільшення яскравості периферії при кутовому розмірі центральної ділянки поля зору $\theta = 1^\circ$.

Швидкість розрізнення кільця Ландольта також залежить від відношення $L_{\text{п}}/L_{\text{ц}}$ і кутового розміру центральної ділянки поля зору. Підвищення граничної різниці яскравості, а також зниження швидкості розрізнення й інших функцій зору при наявності на периферії підвищеної яскравості в порівнянні з яскравістю центральної частини полючи зору прийнято пояснювати виникненням вуалюючої завіси.

Модель Холледея про вуалюючу завісу заснована на еквівалентному обліку підвищення порогової різниці яскравостей з появою в полі зору спостерігача блискучого джерела. Відношення граничної різниці яскравостей об'єкта спостереження і фону при наявності й відсутності джерела блиску в полі зору спостерігача визначається так:

$$\frac{(\Delta L_{\text{пор}})_s}{\Delta L_{\text{пор}}} = \frac{L_{\text{ад}} + \beta}{L_{\text{ад}}}, \quad (1.1)$$

де $\Delta L_{\text{пор}}$ — порогова різниця яскравостей об'єкта на фоні рівномірної яскравості;

$(\Delta L_{\text{пор}})_s$ — те ж при наявності в полі зору блискучого джерела;

$L_{\text{ад}}$ — яскравість адаптації;

β — яскравість вуалюючої завіси.

Відношення порогових значень різниці яскравостей об'єкта і фону при наявності в полі зору спостерігача блискучих джерел $(\Delta L_{\text{пор}})_s$ і при рівномірній яскравості усього поля зору $\Delta L_{\text{пор}}$ прийнято називати

коефіцієнтом осліпленості. Значення цього коефіцієнта можна визначити так:

$$S = \frac{(\Delta L_{\text{пор}})_s}{\Delta L_{\text{пор}}} = 1 + \frac{\beta}{L_{\text{ад}}} \quad (1.2)$$

Для практики розрахунку зручніше користуватися показником осліпленості, який чисельно дорівнює

$$s = (S - 1) \cdot 10^3 \quad (1.3)$$

де s — показник осліпленості.

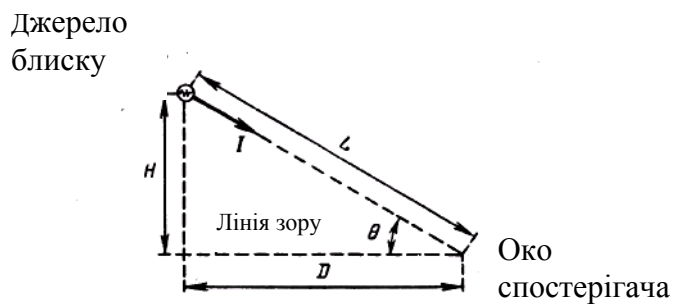


Рис. 1.11 - Схема розташування джерела блиску.

Яскравість вуалюючої завіси, що створена точковим випромінювачем, розташованим у полі зору спостерігача, за рішенням МКО визначається освітленістю площини зіниці ока спостерігача E і кутом θ між лінією зору і променем від блискучого джерела в напрямку до ока спостерігача (рис. 1.11):

$$\beta = m \frac{E_{\text{зр}}}{\theta^2}, \quad (1.4)$$

де E_z — освітленість площини зіниці ока спостерігача, лк;

θ — кут дії блиску, град;

β — яскравість вуалюючої завіси, кд/м²;

m — постійний коефіцієнт ($m = 10$).

Результати наступних досліджень показали, що коефіцієнт m залежить від яскравості блискучого джерела. Для яскравості $L \leq 10^6$ кд/м²:

$$m = 3 \lg L - 8,54 \quad (1.5)$$

де L — яскравість блискучого джерела в напрямку до ока спостерігача, кд.

Рівняння (1.5) може застосовуватись для $5 \cdot 10^3$ кд/м² $\leq L \leq 10^6$ кд/м². Відповідно до (1.4) і (1.5) яскравість вуалюючої завіси для $L \leq 10^6$ кд/м² визначається за формулою (1.6)

$$\beta = (3 \lg L - 8,54) \frac{E_z}{\theta^2} = (3 \lg L - 8,54) \frac{I_{\alpha\beta} \cos \theta}{l^2 \theta^2}, \quad (1.6)$$

де $I_{\alpha\beta}$ - сила світла блискучого джерела в напрямку до ока спостерігача, кд;

l — відстань від блискучого джерела до ока спостерігача, м;

Для яскравості $L \geq 10^6$ кд/м² яскравість вуалюючої завіси визначають за формулою:

$$\beta = 9,46 \frac{I_{\alpha\beta} \cos \theta}{L^2 \theta^2}, \quad (1.7)$$

Дослідження яскравості вуалюючої завіси, створюваної блискучим джерелом при $\theta = \text{const}$, показали деяке розходження значень β для різних здовжніх площин ψ (рис.1.2). Як показали результати цих досліджень, розходження значень яскравості завіси, що вуалює, при варіації кутів ψ від 0 до 90°, як правило, не перевищували 10 %. Враховуючи малу складову

яскравості, що вуалює, від джерел блиску, що розташовані в полі зору під великими кутами ψ , при висоті підвісу світильників над рівнем очей спостерігача $H = \text{const}$ з достатньою для практики точністю можна застосовувати рівняння (1.6) і (1.7) для будь-якого розташування джерел блиску.

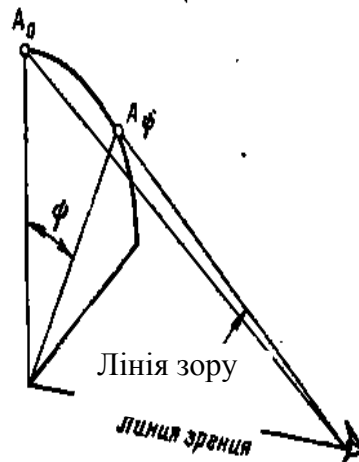


Рис.1.12 - Кутові координати θ і ψ .

При наявності в полі зору декількох джерел блиску сумарне значення яскравості вуалюючої пелени β за рекомендацією IX сесії МКО визначається за правилом адитивності яскравості вуалюючої пелени, що створюється окремими джерелами:

$$\beta_{\Sigma} = m \left(\frac{E_1}{\theta_1^2} + \frac{E_2}{\theta_2^2} + \dots + \frac{E_n}{\theta_n^2} \right). \quad (1.8)$$

Показник дискомфорту. В класифікації явищ осліпленості, яка запропонована IX сесією МКО, зоровий дискомфорт визначений як відчуття незручності або напруженості. Це відчуття виникає в результаті наявності в полі зору світлових плям з яскравістю, що значно перевищує яскравість адаптації спостерігача. Зоровий дискомфорт викликає відволікання уваги і зменшення зосередженості, а також може призвести до зорового і загального

стомлення в результаті тривалого перебування людини в дискомфортних умовах освітлення.

Холледей досліджував суб'єктивне відчуття при появі плями підвищеної яскравості, яка з'являється на адаптаційному фоні рівномірної яскравості $L_{ад}$, що варіюється у межах 0,3 - 320 кд/м². Кутовий розмір плями підвищеної яскравості за діаметром в процесі експерименту варіювався від 18' до 7°. Сліпуча пляма у всіх дослідках розташовувалася поблизу центра поля адаптації. Для порівняльної оцінки виникаючого відчуття Холледей запропонував наступне емпіричне рівняння:

$$N = a + \lg L_d + 0,25 \lg \omega - 0,3 \lg L_{ад}, \quad (1.9)$$

де a — постійна, залежна від вибору одиниць яскравості;

L_d — яскравість досліджуваної сліпучої плями, кд/м²;

ω — тілесний кут сліпучої плями, *стер*;

$L_{ад}$ — яскравість адаптації, кд/м².

N — критерій, що визначає рівень відчуття. Для різних ступенів відчуття Холледей запропонував наступну шкалу рівнів зорового відчуття (див. табл. 1.1).

На кафедрі світлотехніки МЕІ для оцінки дискомфортної яскравості L_d в різних умовах, що наближаються до реальних варіантів освітлювальних

Таблиця 1.1. Шкала рівнів зорового відчуття

N	Суб'єктивна оцінка якості освітлення
0,30	Ледь помітно
0,60	Найбільше приємно
0,90	Приємно
1,20	На грані приємного і байдужного
1,70	Байдуже
1,90	На грані байдужного і неприємного
2,2	Трохи неприємно
2,4	Неприємно
2,6	На грані нестерпного і неприємного
2,8	Неприємно і болісно

установок, було проведено експерименти під керівництвом М. М. Єпанешнікова. Результати експериментів дозволили сформулювати залежність дискомфортної яскравості L_d від яскравості фону, який визначає рівень адаптації L_{ad} , тілесного кута світлої плями ω , що викликає виникнення дискомфорту, і кутового зсуву θ світлої плями щодо лінії зору спостерігача:

$$L_d = M\varphi(\theta)\sqrt{\frac{L_{ad}}{\omega}}, \quad (1.11)$$

де L_d — яскравість світлої плями, що викликає дискомфорт, кд/м^2 ;

M — показник дискомфорту; $\varphi(\theta)$ — індекс позиції дискомфортної плями відносно лінії зору спостерігача; L_{ad} — яскравість адаптації, кд/м^2 ; ω — тілесний кут дискомфортної плями, *стер*.

Показник дискомфорту M визначається імовірністю p оцінки відчуття потемніння фону при заданих значеннях L_{ad} , ω і θ (рис. 1.13). При імовірності $p = 0,5$ показник дискомфорту для досліджених меж варіацій L_{ad} , ω і θ має значення $M = 25$. Отже, якщо прийняти, що 50% спостерігачів оцінюють установку дискомфортною, рівняння (1.11) можна записати в остаточному вигляді:

$$L_d = 25\varphi(\theta)\sqrt{\frac{L_{ad}}{\omega}}. \quad (1.12)$$

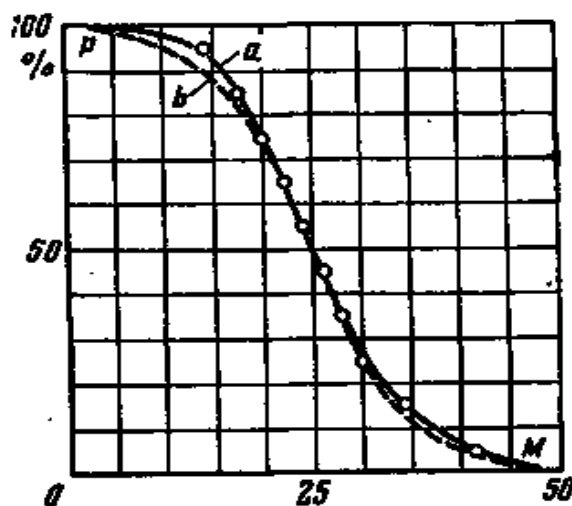


Рис. 1.13 - Залежність імовірності оцінки установки комфортної у функції показника дискомфорту: а — усереднена крива; б — крива Гауса.

Результати дослідження залежності дискомфортної яскравості L_d від індексу позиції $\phi(\theta)$ показали істотне розходження $\phi(\theta)$ для різних меридіональних перетинів (рис. 1.14). Досить близький збіг результатів досліджень індексу позиції, отриманих М.М. Єпанешніковим і С. Гутом, дозволило рекомендувати для практики проектування сімейство кривих постійних значень індекса позиції $p = f(a/l, h/l)$ за С. Гуту (рис.1.15).



Рис. 1.14 - Залежність індексу позиції від положення блискучого джерела: 1 — за даними Лекіша — Гута; 2 — за даними МЕІ; 3 — за матеріалами Нетушила; 4 — кути θ у горизонтальній площині.

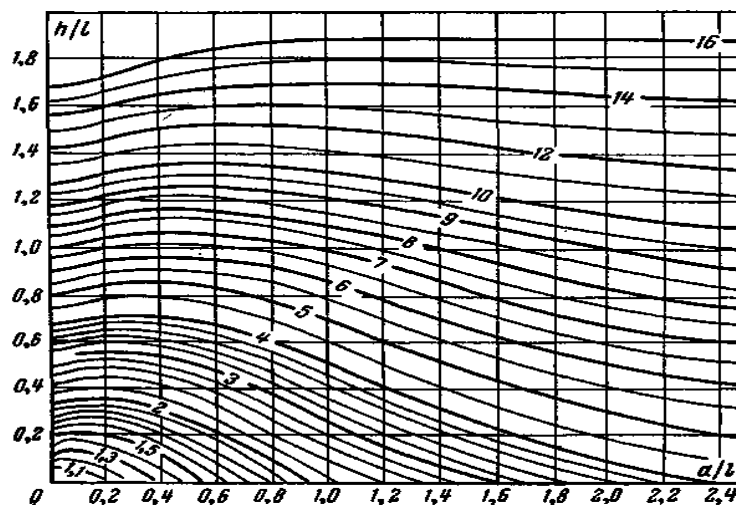


Рис. 1.15 - Графік Лекіша — Гута для визначення індекса позиції $\phi(\theta)$.

Для вибору припустимого рівня дискомфорту в освітлювальних установках різного призначення були розраховані рівні зорового відчуття по Холледю (1.9) і зіставлені з показниками дискомфорту M по МЕІ (1.11) для рівнояскравого поля зору, на якому була розташована яскрава пляма ($\omega = 0,006 \div 0,012$ *стер*) при варіаціях $L_{ад}$ і $L_{д}$ у широких межах. Результати зіставлення (рис. 1.16) наведені у вигляді графіка $N = f(M)$. Граничне значення показника дискомфорту для приміщень з підвищеними вимогами $M \leq 25$ відповідає показникові засліпленості $s = 5 \div 6$, що істотно нижче нормованих значень показника засліпленості для виробничих приміщень з точною роботою $s = 20 \div 40$.

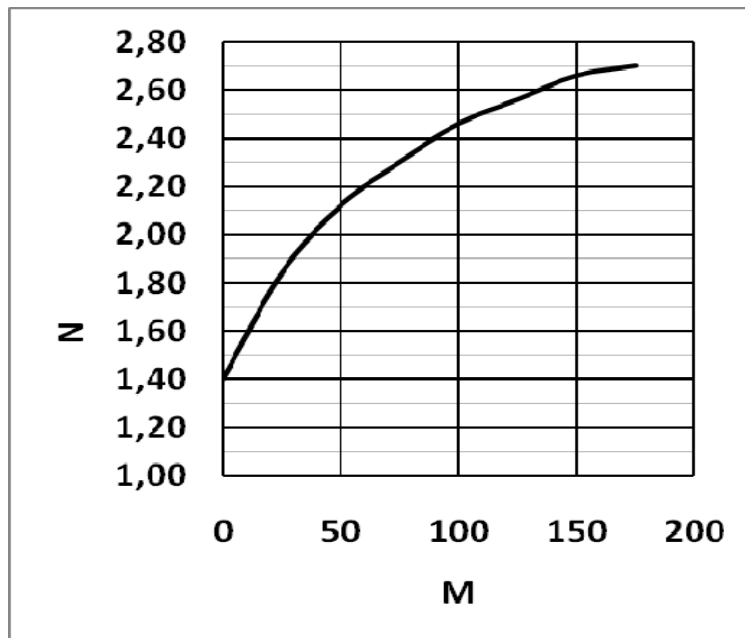


Рис.1.16 - Залежність показника за Холледєм від показника дискомфорту за МЕІ.

У практиці проектування освітлювальних установок, як правило, приходится оцінювати по дискомфорту установки з великою кількістю світлових приладів або великими по площі поверхнями, що світять.

Результати дослідження дискомфорту, створюваного сукупністю декількох випромінювачів (від 2 до 20), розташованих у полі зору

спостерігача під різними кутами θ , дозволили сформулювати правило сумачії показників дискомфорту [14 - 16]:

$$M_{\Sigma} = \left[\sum_{i=1}^{i=n} M^2_i \right]^{0,5}, \quad (1.13)$$

Для сукупності точкових випромінювачів, розташованих у полі зору спостерігачів, рівняння (1.13) можна привести до наступного вигляду:

$$M = \frac{1}{hL_{ад}^{0,5}} \left[\sum I_a L_a f^2(\theta) \right]^{0,5}, \quad (1.14)$$

де I_a, L_a — значення сили світла і середньої габаритної яскравості світлового приладу в напрямку до ока спостерігача, кд, кд/м²;

h - висота розташування світлових приладів над рівнем ока спостерігача, м;

$L_{ад}$ — яскравість адаптації, кд/м²;

$f(\theta) = \frac{\sin \theta_v \cos \theta_r}{P}$ - функція положення світлового приладу

щодо ока спостерігача;

P — індекс позиції за Гутом (рис. 1.17).

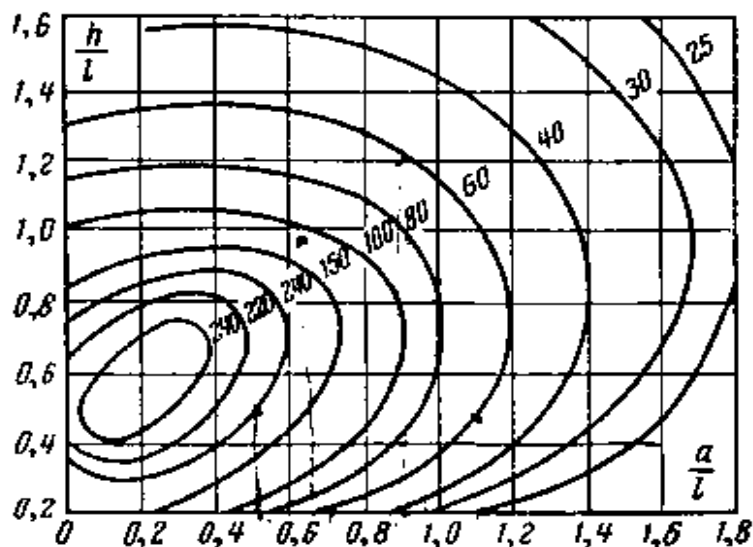


Рис. 1.17 - Графік функції $P_i(\theta)$ для розрахунку сумарного показника дискомфорту.

1.3. НЕСТАЛИЙ ЗОРОВИЙ ПРОЦЕС

Перетворення випромінювання в зорове відчуття є дуже складним процесом, що складається з ряду етапів, кожен з яких має кінцеву тривалість. Все це визначається інерційністю ока. Інерційність ока в усіх його ланках призводить до деякого запізнювання виникнення відчуття, поступового його розвитку і загасання. Рівень збудження також впливає на тривалість і хід загасання зорових відчуттів після припинення дії випромінювання на око.

Тимчасові характеристики зорового процесу визначаються не лише кінцевою тривалістю усіх ланок перетворення і ходом їх розвитку в часі, але також і зміною чутливості ока при переході з одного рівня на інший.

Інерційні властивості ока та його здатність до адаптації призводять до несталих станів аналізатора, що виникають при зміні рівня його збудження.

Несталі стани характеризуються зміною співвідношення між яскравістю випромінювання, діючого на око, в досліджуваний момент часу і рівнем зорового відчуття - світлотой В. Це зміна в несталих фазах зорового процесу відбувається в результаті виникнення і розвитку наступних перехідних явищ:

- поступового розвитку зорового відчуття в результаті кінцевої тривалості усіх етапів його виникнення;
- наслідки післядії іонів розпаду молекул фотореагенту, що знаходяться в зорових клітинах з моменту закінчення дії попереднього подразника;
- зміною чутливості органу зору при зміні рівня збудження.

Внаслідок того, що в звичайних умовах роботи ока за наявності нерівномірного розподілу яскравості, а також при короткочасних появах об'єктів розрізнення у полі зору спостерігача неминучі часті зміни рівнів збудження, вивчення закономірностей невстановленого зорового процесу представляє великий практичний інтерес. Звичайно, ці закономірності значно складніші за закономірності сталих зорових процесів.

Зорова інерція. Інерцією будь-якої системи називається властивість зберігати той стан, в якому вона знаходиться, отже, властивість реагувати на зміни зовнішнього середовища з деяким запізненням.

Зорова інерція визначається реакцією ока не лише на випромінювання, які діють в досліджуваний момент часу, але і на попередні. Тому світлота випромінювання постійної яскравості поступово збільшується і поступово затухає після припинення дії випромінювання. Хід загасання світлоти в часі після припинення дії випромінювання на око називають функцією зорової інерції, а тривалість процесу загасання світлоти - часом зорової інерції.

Наявність у ока інерційності біологічно доцільна, оскільки вона сприяє згладжуванню флюктуацій діючого на око випромінювання і цим забезпечує стійкість зорового процесу.

Зорова інерція виявляється в послідовних образах, що виникають після припинення дії на око випромінювань великої яскравості; у злитті миготінь, що періодично з високою частотою короткочасних випромінювань повторюються; у залежності світлоти від часу дії на око поодиноких світлових короткочасних імпульсів та інше.

Величина, зворотна проміжку часу між моментом дії світла на сітківку і моментом виникнення відповідного зорового враження, - швидкість зорового сприйняття. Вона залежить від умов освітлення і контрасту між деталлю і фоном. При погіршенні контрасту між деталлю і фоном швидкість зорового сприйняття знижується.

Видимість проблисків. Проблисками називаються короткочасні спалахи, що повторюються періодично із заданим інтервалом часу.

Інтенсивність проблисків визначається блиском (освітленістю зіниці ока) для точкових джерел і яскравістю для джерел кінцевих розмірів.

В простому випадку освітленість на зіниці спостерігача або сітківки, створювана проблиском протягом усього часу дії τ , постійна.

В практичних умовах інтенсивність проблиску може змінюватися в часі.

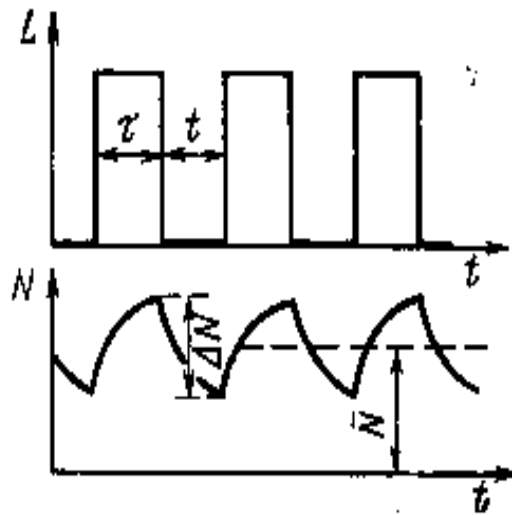


Рис. 1.18 - Умова злитого сприйняття проблісків

Час повного періоду пробліску визначається сумою тривалості спалаху τ і затемнення t :

$$T = \tau + t.$$

Частота спалахів визначається величиною, зворотною часу повного періоду пробліску

$$\nu = 1/T.$$

Відношення часу затемнення до тривалості повного періоду – скважність проблісків.

При малих значеннях частоти спалахів і великій скважності пробліски зорово сприймаються окремо. Зорова інерція викликає злите сприйняття серії проблісків, якщо їх частота достатня велика або скважність незначна.

Мінімальну частоту проблісків, що забезпечує вперше з достатньою достовірністю їх злите сприйняття, прийнято називати критичною частотою миготіння. Вона є граничною частотою між роздільним і злитим сприйняттям проблісків.

Злите сприйняття спостерігається в усіх випадках, коли глибина коливання ефективної яскравості $\Delta L_{\text{еф}}$ або ефективного блиску менше порогової різниці яскравості або освітленості зіниці ока спостерігача.

Закон Тальбота. *При злитому сприйнятті проблесків рівень зорових відчуттів визначається середніми в часі фотометричними параметрами.*

Критична частота миготінь збільшується зі збільшенням яскравості проблесків. Це пояснюється зменшенням порогового контрасту в часі, а також відносним збільшенням глибини коливання ефективної яскравості $\Delta L_{\text{еф}}$ в результаті більш швидкого падіння $L_{\text{еф}}$ в періоди затемнення.

Значення критичної частоти миготінь змінюється в значних межах 5-100 с⁻¹ залежно від яскравості миготілого джерела та яскравості адаптації.

Послідовні образи. Зорове відчуття, що зберігається в нашій свідомості протягом деякого проміжку часу після припинення безпосередньої дії на наше око випромінювання, називається послідовним образом.

Причинами виникнення послідовних образів є зорова інерція і адаптаційні зміни ока та зорових центрів кори головного мозку.

Роль інерційності зорових процесів у формуванні послідовних образів визначається наявністю у світлочутливих клітинах іонів розпаду після закінчення дії випромінювання. Негативні іони, концентруючись в перших синапсах, викликають виникнення імпульсів струму дії.

Адаптаційні зміни чутливості ока протягом усього часу існування послідовного образу визначаються зміною концентрації молекул фотореагенту, а також чутливості головного мозку.

Послідовний образ, що виник в нашій свідомості після припинення освітлення ока, визначається процесами інерції та адаптації в зоні зображення джерела послідовного образу. Процес інерції зорового відчуття джерела послідовного образу є затухаючим в результаті поступового зниження концентрації негативних іонів розпаду.

Процес адаптації характеризується плавним підвищенням світлової чутливості ока в зоні локалізації послідовного образу, визначається в основному зростанням концентрації молекул фотореагенту в цій зоні сітківки.

Наступні образи, що виникли на центральній частині сітківки, мають більшу тривалість, ніж образи, що виникли на периферії сітківки.

Стробоскопічний ефект. Цей ефект полягає в уявному зоровому сприйнятті безперервного руху при короткочасному періодичному спостереженні окремих послідовних фаз цього руху або як уявне роздільне зорове сприйняття окремих фаз безперервного руху.

При освітленні рухомого предмета роздільними спалахами, що періодично повторюються, зорове сприйняття руху може розпадатися на окремі фази. При досить великій швидкості руху, яка забезпечує досить велику відстань, пройдену тілом за кожен період спалаху, рухомий предмет зорово сприйматиметься таким, що одночасно знаходиться в різних точках свого шляху, тобто один рухомий предмет ілюзорно сприйматиметься як декілька однакових предметів.

У тих випадках, коли фази руху, що зорово сприймаються протягом суміжних за часом спалахів, близькі один до одного, спостерігач сприймає сукупність дискретних положень рухомого предмета як безперервний рух.

Спостерігач може сприймати рух безперервним навіть в тих випадках, коли скважність проблесків досить велика і частота спалахів нижче критичної частоти миготіння.

Рух сприймається завдяки стробоскопічному ефекту безперервним і в тих випадках, коли спостерігачеві пред'являються нерухомі зображення різних фаз руху, наприклад, в умовах кінопроекції.

Для виникнення стробоскопічного ефекту не обов'язкове чергування світлових спалахів з повною темрявою. Досить глибокі періодичні коливання світлового потоку джерела також можуть викликати виникнення цього ефекту, наприклад, при освітленні люмінесцентними лампами і особливо розрядними лампами.

РОЗДІЛ 2. КОЛОРИМЕТРІЯ

Колориметрія - розділ фізіологічної оптики, який присвячений методам кількісної оцінки сприйняття кольору.

Колірна чутливість. Колір та колірність.

Людина, зорово сприймаючи навколишні предмети, здатна виявити їх відмінності та схожість не лише за формою, визначуваною їх контуром і рельєфом, але також за їх кольором.

Здатність органу зору розрізняти різноколірні випромінювання обумовлена наявністю рецепторів, що мають різні спектральні чутливості.

Сприйняття кольору обумовлене наявністю в зоровому аналізаторі трьох типів колб з різною формою кривої спектральної чутливості - ЧЗС рецептори.

Відповідно до трикомпонентної теорії колірного зору колби кольоросприймаючого апарату ока бувають трьох видів: червоновідчуваючі (Ч - рецептори), зеленівідчуваючі (З - рецептори) і що синьовідчувають (С - рецептори).

Комплекс зорового відчуття, визначуваний загальним рівнем збудження органу зору й співвідношенням рівнів збудження трьох його ЧЗС - рецепторів, прийнято називати відчуттям кольору.

Відчуття кольору можна умовно ділити на дві складові: кількісну - світлоту і якісну - відчуття колірності.

Розподіл на якісну і кількісну складові відчуття кольору лежить в основі сучасної колориметрії.

Міра розрізнення та умови рівності відчуттів колірності встановлюються експериментально зоровим зіставленням двох оптично змінних полів порівняння, заповнених равнояскравими та різноспектральними випромінюваннями. Експерименти, метою яких є підбір

різних за спектральним складом випромінювань, невиразних в умовах оптичного контакту, прийняти називати колориметричними.

Прикладом можливості виникнення однакових відчуттів колірності від різноспектральних випромінювань можуть служити білі випромінювання: рівноінтенсивні та такі, що складаються з двох монохроматичних випромінювань - додаткових кольорів.

Таких білих випромінювань, отриманих в результаті суміші двох монохроматичних випромінювань, може бути дуже багато. Тотожність різноспектральних відчуттів виникає в результаті однакового співвідношення рівнів збудження ЧЗС-рецепторів органу зору.

Випромінювання, що викликають однакові відчуття колірності, прийнято називати одноколірними.

Якісну характеристику випромінювання, визначувану різним співвідношенням рівнів реакції трьох приймачів середнього ока, прийнято називати колірністю.

Середнім оком називають деякий трикомпонентний приймач, спектральна чутливість кожного компонента якого залежить тільки від довжини хвилі і з достатньою точністю відтворює стандартизовані середні значення спектральної чутливості ЧЗС - рецепторів органу зору людини у відносних одиницях.

Колірність випромінювання визначається його спектральним складом. Однакову колірність можуть мати випромінювання з різними спектральними складами.

Разом з цим заданому спектральному складу випромінювання відповідає єдино можлива колірність, оскільки будь-який заданий спектральний склад однозначно визначає співвідношення рівнів реакції ЧЗС-приймачів середнього ока.

Для комплексної якісної та кількісної оцінки випромінювання вводять поняття про колір випромінювання. Колір слід розглядати як деяку

властивість випромінювання, що визначає результат його дії на середнє око за відчуттям колірності та світлоти.

Колір випромінювання характеризується його яскравістю і колірністю. Колір величина багатовимірна.

Багатовимірність відчуття колірності характеризується тим, що кількісне її вираження можна однозначно визначити двома коефіцієнтами коліровідчуття. Відчуття колірності є двомірною величиною.

Відчуття кольору, що оцінюється світлотою і відчуттям кольоровості, так само як і колір, що оцінюється яскравістю і двомірною величиною колірності, є тривимірними величинами.

Тривимірність кольору випромінювання і відчуття кольору визначаються трикомпонентністю органу зору як приймача випромінювання

.Основні кольори. В колориметрії будь-який колір виражається трьома числами колірних координат.

Числа координат є кількостями, в яких виражаються всілякі кольори, називаються основними.

Жоден з основних кольорів не повинен виходити змішенням двох інших. Основні кольори мають бути незалежними один від одного.

Основні кольори бувають реальними і нереальними. Реальні кольори можна отримати практично, діючи на око випромінюваннями певних спектральних складів. Нереальні кольори практично отримати не можна, оскільки не існує випромінювань, які викликали б відчуття таких кольорів за нормальних умов зору. Але характеристику будь-якого нереального кольору (колірний тон, чистота, яскравість) можна вичислити, якщо представити його як комбінацію реальних кольорів.

Прикладом трьох реальних основних кольорів є фізіологічні кольори Ч, З і С, тобто кольори основних збуджень. Вони обчислюються за спектральним складом випромінювань і спектральною чутливістю трьох приймачів ока.

Аддитивне змішення кольорів. Схеми аддитивного змішення

Основним способом встановлення зорової тотожності або міри розрізнення різноспектральних випромінювань є зорове порівняння їх з сумішшю трьох кольорів.

Аддитивне змішення кольорів, яке засноване на принципі порівняння сумарної дії трьох змішуваних кольорів і досліджуваного кольору, можна здійснювати за наступними схемами:

- оптичне змішення;
- послідовне змішення;
- просторове змішення.

Оптичне змішення кольорів здійснюється за допомогою багатократних віддзеркалень змішуваних випромінювань в спеціальній камері змішення або на невідбірково віддзеркалювальній дифузній поверхні (оксиді агнія або барії, гіпсі та ін.)

Колір відбитого від такої поверхні випромінювання однозначно визначається координатами кольору змішуваних кольорів. Камери змішення виконують звичайно у вигляді порожнистих куль, стінки яких пофарбовані білою дифузною фарбою. Спрямовані всередину камери різноколірні випромінювання змішуються в результаті МКО від стінок камери змішувача. Колір випромінювання, відкинутого будь-якою ділянкою внутрішньої поверхні такої камери, характеризується сумою змішуваних кольорів.

Приклад оптичного змішування трьох кольорів простого зорового колориметра складається з білої гіпсової призми, одна грань якої освітлена випромінюванням досліджуваного кольору, а інша - сукупністю трьох різноколірних випромінювань.

Спостерігач, що розглядає обидві освітлені грані призми через діафрагму, бачить два оптично суміжні поля порівняння.

Зміною кількісних пропорцій суміші трьох кольорів А, В, і С за допомогою варіації відстаней від трьох джерел світла до грані призми або будь-яким іншим способом (за допомогою діафрагми) можна міняти

колірність суміші. Змінюючи колірність аддитивної суміші кольорів та її яскравість, можна підібрати умови зорової тотожності полів порівняння. У тому випадку, коли будь-яка пропорція суміші трьох кольорів А, В, С відрізняється від досліджуваного кольору D внаслідок більшої його чистоти, можна отримати зорову тотожність полів порівняння, переводячи один з кольорів змішення на праву грань призми.

В цьому випадку тотожність можна записати колірним рівнянням, в якому одна з координат кольору, наприклад координата Z, буде негативна:

$$D = A + B - C;$$

$$D = a'A + b'B - c'C,$$

де А, В, С, D - кольори (a', b', c' - компоненти кольору).

Перші дослідження аддитивного оптичного змішення кольорів і формулювання основних положень про колір складного випромінювання належать Ньютону.

Результати експериментальних досліджень розкладу білого випромінювання на монохроматичні при проходженні пучка променів через призму, а також оптичного змішення кольорів монохроматичного випромінювання за допомогою збиральної лінзи були покладені в основу вчення про колір.

Основні положення колориметрії, сформульовані Ньютоном:

- розділені якісна і кількісна оцінка випромінювання;
- сформульовані поняття про фізичну основу кольору і фізіологічної суті його відчуття;
- сформульовано поняття про колір складного випромінювання як колір суміші кольорів монохроматичних випромінювань;
- дано поняття про додаткові кольори.

Закон Грассмана. На основі дослідів по змішенню кольорів Грассманом був сформульований основний закон колориметрії: будь-які

чотири кольори знаходяться в лінійній залежності між собою, існує необмежене число комбінацій з трьох незалежних кольорів.

Будь-яка колориметрична система повинна будуватись на основі трьох незалежних кольорів. Оскільки існує велика кількість комбінацій з трьох незалежних кольорів, то і колориметричних систем може бути побудована необмежена кількість.

Будь-якому спектральному складу випромінювання відповідає строго певний колір, в той же час один і той же колір може бути отриманий шляхом змішення трьох незалежних кольорів різного спектрального складу.

Колір є тривимірною характеристикою, яка визначає кількісну і якісну характеристику випромінювання.

Відчуття кольору визначається загальним рівнем збудження трьох аналізаторів, що відчують колір, які визначають кількісну характеристику кольору, тобто яскравість або іншу фотометричну величину і якісну характеристику, яка визначається співвідношенням рівнів збудження трьох аналізаторів, що відчують колір, тобто колірність випромінювання.

_____ Колірність є двомірною характеристикою.

У спектрі безперервного випромінювання при зміні довжини хвилі колір плавно переходить від одного до іншого. Не існує окремих ізольованих кольорів.

Принципи побудови колориметричних систем. Єдиною обов'язковою умовою для побудови колориметричної системи є вивід трьох лінійно-незалежних кольорів, які беруться як основні кольори цієї колориметричної системи.

Колір може бути поданий у вигляді вектора у тривимірному колірному просторі:

$$D = \check{a}'\vec{A} + \check{a}'\vec{A} + \check{n}'\vec{N}$$

a', b', c' - координати кольору випромінювання, вони показують скільки одиниць основних кольорів необхідно взяти, щоб отримати досліджуваний колір.

$a = a'/m; \quad b = b'/m; \quad c = c'/m$ – координати колірності,

$m = a' + b' + c'$ - модуль кольору.

Спрямованість вектора кольору однозначно визначає колірність випромінювання.

Площина, яка проходить через одиничні значення координат, називається площиною одиничних кольорів.

Кожному напрямку вектора кольору відповідає строго певна точка перетину з площиною одиничних кольорів.

Положення цієї точки однозначно визначається співвідношення координат кольору, тобто координатами колірності.

Лінія на площині одиничних кольорів, відповідна однорідним випромінюванням (колірність строго визначена), називається локусом.

Ця лінія є безперервною, опуклою, на усьому своєму протязі і незамкнутою.

Лінія, що сполучає крайні точки локуса, називається лінією пурпурних кольорів. Вона відповідає колірності суміші червоних і фіолетових випромінювань, тобто пурпурним кольорам.

Положення точки білого кольору Б визначається вибором основних кольорів та їх кількісним змістом в одиниці кольору.

При побудові реальних колориметричних систем кількісне співвідношення одиниць основних кольорів бажано вибирати таким чином, щоб точка білого кольору знаходилася в центрі трикутника основних кольорів. При цьому забезпечуватиметься рівномірність заповнення трикутника основних кольорів реальними кольоровостями:

$$a_B = b_B = c_B = 1/3;$$

$$a_B + b_B + c_B = 1.$$

Сума координат колірності будь-якого випромінювання дорівнює одиниці. Тому для характеристики якісної сторони кольору, його колірності, досить знати дві координати колірності.

При побудові реальних колориметричних систем зазвичай користуються проекцією площини одиничних кольорів на одну з координатних площин.

Для розрахунку координат кольору користуються питомими координатами кольору $\bar{a}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$, $\bar{c}(\lambda)$ - координатами кольору однорідних випромінювань, потік яких дорівнює 1 Вт:

$$\bar{a}(\lambda) = a' / \Phi_{e\lambda}, \quad \bar{b}(\lambda) = b' / \Phi_{e\lambda}, \quad \bar{c}(\lambda) = c' / \Phi_{e\lambda}.$$

Координати кольору складних випромінювань:

$$a' = \int \varphi_e(\lambda) \bar{a}(\lambda) d\lambda; \quad b' = \int \varphi_e(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda; \quad c' = \int \varphi_e(\lambda) \bar{c}(\lambda) d\lambda$$

Координати кольору однорідних випромінювань:

$$a' = \sum_{i=1}^n \Phi_{e\lambda i} \cdot \bar{a}_{\lambda i}; \quad b' = \sum_{i=1}^n \Phi_{e\lambda i} \cdot \bar{b}_{\lambda i}; \quad c' = \sum_{i=1}^n \Phi_{e\lambda i} \cdot \bar{c}_{\lambda i};$$

де $\bar{a}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$, $\bar{c}(\lambda)$ - питомі координати кольору.

Яскравість кольору:

$$L_p = 683 A_p = 683 \cdot (A_a \cdot a' + A_b \cdot b' + A_c \cdot c'),$$

де A_p і A_a, A_b, A_c - яскравісні коефіцієнти кольору Р та основних кольорів колориметричної системи А, В, С.

Координати кольору відбитих і пропущених оптичними зразками випромінювань:

$$a'_\rho = \int \varphi_e(\lambda) \bar{a}(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda; \quad b'_\rho = \int \varphi_e(\lambda) \bar{b}(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda; \quad c'_\rho = \int \varphi_e(\lambda) \bar{c}(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda$$

$$a_{\tau}' = \int \varphi_e(\lambda) \bar{a}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda; b_{\tau}' = \int \varphi_e(\lambda) \bar{b}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda; c_{\tau}' = \int \varphi_e(\lambda) \bar{c}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda$$

Міжнародна колориметрична система RGB. В основу цієї колориметричної системи взяті випромінювання реальних кольорів - червоне, зелене, синє.

Під яскравісними характеристиками розуміють значення фотометричної величини в одиницях, в 683 рази більших, ніж прийняті фотометричні поняття.

Якщо кількісний зміст основних кольорів взяти однаковим, то суміш рівних одиниць дасть практично синій колір.

Для того, щоб точка білого кольору знаходилася в центрі трикутника одиничних кольорів, тобто колірності $r = g = b = 1/3$, яскравісні коефіцієнти, визначувані кількісним змістом основних кольорів, повинні знаходитися в співвідношенні $\Lambda_R: \Lambda_G: \Lambda_B = 1:4,59:0,0601$:

$$\mathbf{R}: \lambda_R = 700 \text{ нм}, \quad \Lambda_R = 1;$$

$$\mathbf{G}: \lambda_G = 546,1 \text{ нм}, \quad \Lambda_G = 4,591;$$

$$\mathbf{B}: \lambda_B = 435,8 \text{ нм}, \quad \Lambda_B = 0,0601;$$

$$\Phi_R = 683 \text{ лм}, \quad \Phi_G = 3135 \text{ лм}, \quad \Phi_B = 41 \text{ лм}.$$

Далі, на основі експериментів по змішенню кольорів визначають координати кольору однорідних випромінювань одиничної потужності, тобто питомі координати кольору :

$$\bar{r}(\lambda) = \frac{r'(\lambda)}{\Phi_e(\lambda)}, \quad \bar{g}(\lambda) = \frac{g'(\lambda)}{\Phi_e(\lambda)}, \quad \bar{b}(\lambda) = \frac{b'(\lambda)}{\Phi_e(\lambda)}.$$

Яскравість кольору D :

$$L_D = 683 \Lambda_D = 683 (\Lambda_R \cdot \bar{r}' + \Lambda_G \cdot \bar{g}' + \Lambda_B \cdot \bar{b}').$$

Для деякої частини реальних кольорів і практично для усіх однорідних випромінювань в системі RGB одна з координат кольору є негативною.

Достоїнства:

- основні кольори реально відтворені;

- точка білого кольору знаходиться в центрі колірної трикутника, що забезпечує рівномірне заповнення останнього колірностями випромінювань різної насиченості.

Недоліки:

- частина реальних кольорів має негативні координати;
- кількісна характеристика кольору визначається трьома величинами, тобто трьома координатами кольору.

Колориметрична система XYZ/ Питомі координати кольору в колориметричній системі XYZ визначаються шляхом перерахунку відомих питомих координат системи RGB.

$$X = 0,4185R - 0,092G + 0,0009B;$$

$$Y = -0,1588R + 0,2524G + 0,0025B;$$

$$Z = 0,0829R + 0,0157G + 0,1786B;$$

$$\Lambda_X = 0; \quad \Lambda_Y = 1; \quad \Lambda_Z = 0. \quad \Phi_X = 0; \quad \Phi_Y = 683 \text{ лм}; \quad \Phi_Z = 0.$$

$$x' = 2,17 r' + 1,75 g' + 1,13 b';$$

$$y' = r' + 4,591 g' + 0,0601 b';$$

$$z' = 0,0565 g' + 5,594 b'.$$

Достоїнства:

- всім реальним кольорам відповідають позитивні значення координат кольору;

- кількісна характеристика кольору визначається однією координатою, координатою у;

- точка білого кольору знаходиться в центрі колірної трикутника.

Недоліки: основні кольори не є реальними, фізично вони невідтворні; візуальні експерименти по змішенню кольорів в цій системі неможливі.

Колориметрична система ФλР. Ф - кількісна характеристика кольору, визначається фотометричною величиною, в одиницях світлового потоку;

λ - колірний тон (домінуюча довжина хвилі);

ρ - чистота кольору.

Колірний тон - довжина хвилі однорідного випромінювання, яка в суміші з білим кольором дасть досліджуваний колір:

$$\Phi_D = \Phi_\lambda + \Phi_B;$$

$$p = \frac{\Phi(\lambda)}{\Phi_D} = \frac{\Phi(\lambda)}{\Phi(\lambda) + \Phi_B} - \text{чистота кольору.}$$

Чистота кольору визначається відношенням однорідного потоку до повного потоку випромінювання.

Максимальне значення чистоти кольору $p = 1$, це відповідає однорідному випромінюванню.

Випромінювання білого кольору $p = 0$.

В області пурпурних кольорів колірний тон визначається довжиною хвилі того випромінювання, яке в суміші з досліджуваним дає білий колір.

Джерела білого кольору. Стандартним джерелом А є випромінювання чорного тіла при температурі 2856 К. Стандартні джерела МКО В і Д відтворюють денне випромінювання у видимому діапазоні спектру. Стандартне джерело С відтворює випромінювання денного неба, його кольорів, $T_c = 6770$ К.

Стандартні джерела світла:

Стандартне ДС	T_c , К	X_{10}	Y_{10}
А	2856	0,4512	0,4059
В	4874	0,3498	0,3527
С	6774	0,3104	0,3191
Д50	5003	0,3478	0,3595
Д55	5503	0,3341	0,3487
Д65	6504	0,3138	0,3310
Д75	7504	0,2296	0,3173

Випромінювання D_{65} є фазою денного світла з коригованою колірною температурою $T_c = 6500$ К.

Коригована температура - це температура повного випромінювача, колір якого має ту ж колірність, що і випромінювання денного випромінювання.

У випадках, коли D_{65} не може бути використаний, рекомендується користуватися по можливості одним з двох розподілів $S(\lambda)$ для випромінювань D_{65} або D_{75} (наводяться в таблицях). Випромінювання D значно більш повно, ніж B і C , представляють УФ діапазон спектру денного світла. Це важливо, коли колориметричному аналізу піддаються зразки, що люмінесціюють під дією УФ випромінювання.

Фізіологічна колориметрична система ЧЗС. Ця система побудована на основі трьох приймачів випромінювання, відносна спектральна чутливість яких відповідає відносній спектральній чутливості трьох кольорочутливих рецепторів ока (ЧЗС):

$$\bar{k}(\lambda) = S_{\text{ч}}(\lambda);$$

$$\bar{p}(\lambda) = S_{\text{з}}(\lambda);$$

$$\bar{\zeta}(\lambda) = S_{\text{с}}(\lambda);$$

$$D = \text{ч}'\text{Ч} + \text{з}'\text{З} + \text{с}'\text{С}.$$

Координати кольору $\text{ч}'$, $\text{з}'$, $\text{с}'$ пропорційні реакції ЧЗС-рецепторів на задане випромінювання.

Координати колірності:

$$\text{ч} = \frac{\text{ч}'}{\text{ч}' + \text{з}' + \text{с}'}; \quad \text{з} = \frac{\text{з}'}{\text{ч}' + \text{з}' + \text{с}'}; \quad \text{с} = \frac{\text{с}'}{\text{ч}' + \text{з}' + \text{с}'}.$$

Рівноконтрасні колориметричні системи. Під порогом кольоророзрізнення розуміють мінімальну різницю в координатах кольору, при якій спостерігається з вірогідністю 50% колірна відмінність.

На основі численних досліджень була створена рівноконтрасна колориметрична система UVW, в якій на діаграмі колірності однакою відстані між двома точками відповідає однакова кількість порогів

кольоророзрізнення. Більше трьох колірних порогів розрізняє кожен спостерігач. Якщо це один поріг, то різниці в колірності немає.

Рівноконтрастний графік Джадда. Перша рівноконтрастна діаграма була створена Джаддом на основі аналізу розподілу колірних порогів реальних кольорів на колірному граднику МКО 1931. Розміри еліпсів колірних порогів і їх орієнтація на колірному графіку були різні для різних колірностей.

Для створення рівноконтрастної діаграми було потрібне таке розташування площини одиничних кольорів у просторі нової колірної системи, за яким всі еліпси проектувалися б в колі однакового радіуса. Для виконання цієї умови необхідно було систематизувати форми і розташування рівноконтрастних еліпсів колірності. Наслідком є те, що така систематизація експериментальних кривих і приведення їх до еліптичної форми є відхиленням від дійсного розташування рівноконтрастних кривих.

Розміри рівноконтрастних елементів Джадда були прийняті 10-кратними по відношенню до порогового. Напрям великих осей еліпсів орієнтований по деяких прямих пучка. Це дозволило встановити Джадду наближену залежність між координатами будь-якого кольору колишньої XYZ та новою UVW систем. Координати колірності нової рівноконтрастної системи визначаються у функції координат колірності колишньої системи наступною рівністю :

$$V = \frac{0.6581}{y - 0.1574x + 0.2424} \quad U = \frac{0.4661 + 0.1593y}{y - 0.1574x + 0.2424}$$

Відтворення кольору. Субтрактивний метод отримання кольору.

У цьому методі беруть джерело білого кольору, наприклад розпалений вольфрамовий волосок, який випускає світло усіх довжин хвиль (кольорів спектру), і якими-небудь способом видаляють ті кольори, які не потрібні. Один з таких способів - пропускання білого світу через кольорове скло або кольорову желатинову плівку, що містить певні барвники.

Червоне скло поглинає з білого світу усі кольори, окрім червоного. Пурпурне скло поглинає усі кольори, за винятком червоного і синього.

Ще один метод вилучення непотрібних кольорів з білого світу полягає у використанні пігментів і забарвлених матеріалів (пластмас), які вибірково відбивають світло.

Папір насиченого зеленого кольору поглинає з білого світла усі кольори, окрім зеленого, який він відбиває.

Ідеальна система Гюбля. Передбачає 3 фільтри, що мають коефіцієнт пропускання, який теоретично дорівнює нулю в зоні поглинання і від 0 до одиниці в зонах пропускання.

Якщо взяти три кольорові фільтри, які поглинатимуть з білого світла синє, зелене або червоне світло, то нам ці фільтри здадуться жовтими, пурпурними і блакитними (синьо-зеленими). Наклавши їх тепер попарно один на одного, ми отримаємо три різні кольори: якщо накладається жовтий і пурпурний фільтри, вони поглинатимуть синє і зелене світло, пропускаючи тільки червоне. Жовтий і блакитний в сукупності дадуть зелений, а блакитний і пурпурний - синій кольори.

Три фільтри разом поглинають усі кольори, і представляються чорними.

Аддитивний метод отримання кольорів. Аддитивний метод полягає в тому, що на темний екран проєктують різні кольори, додаючи їх один до іншого. Таким чином, замість того, щоб отримувати червоний колір віднімаючи усі кольори, окрім червоного, з білого світла, ми просто проєктуємо на екран червоне світло.

Якщо ми спроектуємо плями світла, що перекриваються, від трьох проєкторів (за принципом Томаса Юнга), що дають До, З і Зі світло, то в місці попарного перекриття плям отримаємо блакитний, пурпурний і жовтий (кольори, що використовуються як основні). Там, де перекриваються всі три кольори, можна отримати білий колір.

Регулюючи кількість світла від кожного проектора, вдається отримати широку гамму кольорів. Для цього використовують трансформатори, що дозволяють змінити напругу на лампі кожного проектора. Три кольори - До, З і З - є основні кольори і звичайно для отримання найбільш широкого діапазону змішаних кольорів беруть саме їх.

Метамеризм. Можна підібрати два шматки матерії, які при денному освітленні мають однаковий колір, а при освітленні лампами розжарювання виглядають абсолютно по-різному, хоча лампа також випускає біле світло. Це відбувається тому, що відбите світло, хоча воно має різний спектральний склад, підсумовується оком, створюючи в обох випадках відчуття однакового кольору. Але, коли зразки освітлюються лампами розжарювання, тканина І із-за великого віддзеркалення червоного кольору здається коричневою, а другий зразок продовжує здаватися зеленим. Це явище називається метамеризмом. Наприклад, якщо пришити на одяг латку, в точності співпадаючу з матеріалом при освітленні звичайною електричною лампочкою, може виявитися, що вдень латка дуже помітна. Пов'язано це з тим, що барвник, яким забарвлена тканина, дещо відрізняється за своїми спектральними властивостями від барвника латки, і єдиний спосіб уникнути описаних небажаних ефектів - підбирати тканини, забарвлені барвниками в точності однакових спектральних властивостей.

Кольори, що утворюються при інтерференції, дифракції, поляризації та розсіюванні. У фізиці добре відоме явище інтерференції, спостережуване в тонких плівках при освітленні їх білим світлом; кольори в цих випадках утворюються у білого світла шляхом інтерференції на неоднородностях. Прикладом цих явищ може служити фарбування левильних пухирів і масляних плівок на поверхні води.

Тепер широко застосовують інтерференційні фільтри, замінюючи скляні або желатинові. Перевага їх полягає в тому, що вони пропускають дуже вузьку смугу довжин хвиль і тому дають чисті кольори, а також в тому, що при цих довжинах хвиль мають високий коефіцієнт пропускання.

Насправді ці фільтри є інтерферометрами Фабрі-Перо з фіксованим інтервалом. Їх виготовляють, наносячи тонкий шар срібла на скло, потім наносячи шар прозорого кріоліту, а потім ще одну срібну плівку. Кріоліт є прошарком, що створює дуже малу фіксовану відстань між срібними плівками. Якщо товщина шару кріоліту дорівнює 370 нм, то відбувається максимальне пропускання зеленого світла з $\lambda = 500$ нм. Пропускається також світла з довжинами хвиль 1000 і 33 нм, але перше знаходиться в інфрачервоній, а друге - в ультрафіолетовій області. Дивлячись на ці фільтри, можна подумати, що вони забарвлені, тоді як насправді вони зроблені з безбарвних матеріалів. Яскраві оксидні плівки, які здаються інтенсивно забарвленими завдяки інтерпретації, можуть також утворюватися в результаті електролізу на поверхні металів, наприклад, танталу. Ще одне явище, що супроводжується утворенням кольору, - це дифракція; коли через дифракційні ґрати дивляться на білий світ, він здається забарвленим. Спостережувані в природі яскраві кольори часто є результатом інтерференції, а іноді одночасно і інтерференції, і дифракції. Наприклад, кольори пір'я птахів, що перемішуються, обумовлені багат шаровою інтерференцією світла, відбиваного від рогових пластинок, розташованих стопкою до 15 пластинок в кожній. Аналогічним чином виходить забарвлення на крилах павича і зелений металевий блиск поверхні тіла жуків. Усе це забарвлення обумовлене інтерференцією і дифракцією світла, що виникають завдяки складній структурі ребер на лусочках. Періодичністю структури обумовлено також забарвлення перламутру.

До утворення яскравих кольорів за допомогою безбарвних матеріалів може привести також поляризація. Швидкість проходження світлової хвилі через деякі кристали залежить від площини її поляризації (явище, зване подвійним променезаломленням). Це спричиняє уповільнення проходження світла певних частот, і як наслідок, до "вилучення" відповідних кольорів завдяки взаємодії світла з речовиною. Таким чином, з білого світу

"віддаляються" дискретні частоти і виникають яскраві кольори. Це явище легко можна поспостерігати, взявши звичайну прозору ацетатну клейку.

Стрічка має здатність до подвійного променезаломлення, завдяки тому, що при виготовленні її розтягують в здовжньому напрямі. Якщо наклеїти шматочки стрічки на скляну пластинку так, щоб різні її частини містили різне число шарів (усі вони розташовані горизонтально), помістити пластинку між схрещеними поляроїдами (тобто в простий "схрещений" полярископ) і потім розглядати її у світлі джерела білого світу, то пластинка буде яскраво забарвлена.

Кольори, які видимі в полярископі при різному числі шарів.

Число шарів	"Схрещений" полярископ	"Паралельний" полярископ
1	Ясно-жовтий	Синій
2	Блакитний	Помаранчевий
3	Пурпурний	Зелений
4	Ясно-зелений	Пурпурний
5	Темно-зелений	Пурпурний
6	Рожевий	Зелений
7	Синьо-зелений	рожевий

Якщо подивитися на пластинку в "паралельному" полярископі, тобто при паралельному розташуванні поляроїдів, кольори, що виникають в цьому випадку, є додатковими до початково спостережуваних (тобто кольорами, які необхідно додати до початкових для отримання білого світу).

Відтворення кольору. Все життя проходить в колірному оточенні і людина витрачає багато зусиль на те, щоб зробити це оточення як можна приємнішим для очей. З цією метою використовуються або вже забарвлені матеріали, наприклад скло, пластмаса, лінолеум і так далі, або різні емульсії, лаки, фарби.

Якщо колір використовується в інформаційних цілях, застосовують складніші методи - кольорову фотографію, кольоровий друк і телебачення.

Усі вони є методами відтворення кольору. Мета їх - не створення точного еквіваленту об'єкту з фізичної точки зору, а досягнення еквівалентного сприйняття. Так, насичений, майже монохроматичний жовтий колір можна отримати шляхом аддитивного складання червоного і зеленого кольорів, що дасть такий самий жовтий колір. Тому репродукції часто є метамеричними еквівалентами реальних об'єктів. При відтворенні кольорів майже завжди використовується основний трикомпонентний принцип колірного зору.

Кольорова фотографія. Фізична суть звичайної "срібної" фотографії загальновідома. На прозору плівку нанесена желатинова емульсія, в якій знаходяться кристали галогеніду срібла (зазвичай - бромід). Під дією світла в кристалах відбуваються хімічні зміни, тому, спроектувавши через об'єктив на поверхню плівки зображення, ми отримаємо у фотошарі його хімічну картину. Цю приховану картину можна перетворити на видиме зображення, піддавши плівку хімічній обробці.

Цифрова фотографія. Пристрій сучасної цифрової камери практично повністю повторює камеру плівкову. Той же корпус, затвор, об'єктив.. Відмінності починаються за об'єктивом. Замість фотоплівки зображення утворюється на поверхні напівпровідникової матриці. У матриці під дією світла відбуваються не фотохімічні процеси, а фотоелектричні. І, відповідно, усі подальші процеси утворення зображення мають не "хімічний", а "електричний" характер.

Напівпровідникова матриця має багато спільного з фотоплівкою. І там і там зображення будується на світлочутливих "зернах". Тільки у напівпровідниковій матриці такими зернами є не кристали галогеніду срібла, а так звані прилади із зарядовим зв'язком, або ПЗС (по-англійськи - CCD, charge coupled device). Елемент ПЗС має таку властивість, що електрична напруга на його поверхні залежить від міри його освітленості. Чим вище освітленість, тим більше напруга. Розмір кожного такого елемента - всього декілька мікрон. Вони розташовуються на поверхні напівпровідникової пластини у вигляді регулярного растру. Саме тому, на відміну від

традиційної фотографії, де зерна розташовуються хаотично, таке явище, як "зерно", нехарактерне для цифрових фотографій.

Після експозиції кожен ПЗС-елемент виявляється електрично зарядженим до величини, яка пропорційна кількості світла, що потрапила на нього. Таким чином на поверхні напівпровідникової матриці формується електрична картина зображення: найбільш темним місцям відповідає низька напруга, а найбільш світлим - висока.

Після цього залишається зберегти цю інформацію. По-перше, що необхідно зробити, - це записати інформацію про величину електричної напруги в кожній точці матриці. Але цей спосіб не годиться, оскільки характеристики різних матриць відрізняються, і, отже, несумісних форматів зберігання зображень буде велика кількість. Тому, перш ніж інформація буде збережена, вона перетвориться в деякий стандартний формат, такий, який використовується в комп'ютерах. Увесь діапазон яскравостей від чорного до білого розбивається на 256 рівнів. Нульовий рівень відповідає абсолютно чорному, а 255-й - білому кольору. Проміжні рівні - різні відтінки сірого. Так, наприклад, 127-й рівень - це 50% сірий колір, а 63-й рівень - 75%. Відповідно, якщо напруга на ПЗС-елементі відповідає максимальній освітленості, то в пристрій камери, що запам'ятовує, стан цього осередку заноситься як число 255, а інформація про те, що ПЗС-елемент не освітлений, як число 0. ПЗС-елементи нумеруються з 1 по n - рядок, потім з $n + 1$ - другий і так далі.

Таким чином, інформація про рівень освітленості усіх елементів матриці заноситься в пам'ять фотокамери як послідовність чисел: кожне число відображує стан одного ПЗС-осередка. Саме тому "електронна" фотографія називається словом "цифрова".

В реальній кольоровій цифровій камері використовують триканальні матриці, в яких кожна точка (піксел) зображення будується трьома ПЗС-елементами, кожен з яких чутливий (за рахунок застосування мікросвітлофільтрів) тільки до одного з трьох кольорів: червоного, зеленого

або синього. Тому, коли говорять, що в камері використовується матриця в три мільйони пікселів, то реально це означає, що матриця складається не з 3, а $3 \times 3 = 9$ мільйонів ПЗС-елементів. Для збереження інформації про освітленість кожного ПЗС-елемента відведено 256 можливих значень. А зберігання такого числа займає 8 елементів комп'ютерної пам'яті - один байт. Це означає, що зображення, отримане з тієї ж самої "трюхмегапиксельної" матриці, займатиме в пам'яті камери 9 Мегабайт, що складає більше 72 мільйонів елементів пам'яті. Це величезне число. Якщо усю цю послідовність цифр роздрукувати на папері, вона займатиме більше 4000 сторінок.

Саме тому проблема пам'яті для цифрових камер займає найважливіше місце. Якщо зображення записувати в пам'ять камери "як є", то навіть в модулі пам'яті великої місткості вдасться записати всього декілька зображень. Для того, щоб зменшити об'єм записуваної інформації, її піддають спеціальній обробці, стискуванню або компресії. Найбільш простий спосіб компресії полягає в тому, що в записі шукаються однотипні послідовності цифр і записуються в компактнішій формі. Наприклад, послідовність, що описує білу лінію "256 256 256 256 256", можна записати компактніше - 5×256 .

Перевагою такого способу є те, що він ніяк не спотворює зображення, а недоліком те, що таким чином вдається зменшити об'єм зображення всього на декілька десятків відсотків. Тому такий спосіб компресії застосовується лише тоді, коли потрібно отримати зображення найвищої якості.

Набагато частіше для стискування зображень застосовують так званий JPEG-метод. У його основу покладена та властивість людського зору, що колірний дозвіл людського ока помітний гірше чорно-білого. Тому, якщо колірну інформацію зберегти не повністю, то око людини цього практично не помітить. При JPEG-компресії зберігається тільки частина колірної інформації, отриманої з матриці. Тому зображення має спотворення, яке тим помітніше, чим сильніше зображення стисне. Однак цей метод дозволяє зменшити об'єм пам'яті, яку займає зображенням, в десятки разів.

Яким способом були стислі зображення в камері, визначити досить легко. Файли зображень, які стислі методом JPEG, мають розширення .jpg, а стислі без спотворень - інше, найчастіше .tif.

Оцінка якості відтворення кольору. Проблема оцінки якості відтворення кольору виникла в повному обсязі у зв'язку з широким впровадженням кольорового кіно і кольорового телебачення, поширенням різних систем кольорового поліграфічного друку.

Оцінка якості відтворення кольору полягає у встановленні відповідності й міри відмінності зорового сприйняття кольорових об'єктів (оригіналів) і їх репродукцій на екранах телевізорів та кіно, а також на сторінках ілюстрованих книг і журналів.

Критерієм оцінки якості відтворення кольору можуть бути:

- фізична точність відтворення;
- фізіологічна точність відтворення;
- психологічна точність відтворення.

Фізична точність відтворення багатоколірного об'єкта визначається тотожністю спектрального розподілу випромінювань будь-якої точки об'єкту і відповідної до неї точки репродукції (зображення). Ця умова записується наступною рівністю, обов'язковою на будь-якій ділянці спектру і для будь-якої точки або елементу оригінала та його репродукції.

Фізіологічна точність відтворення багатоколірного об'єкта визначається тотожністю відчуття кольору будь-якої точки оригінала і відповідної нею точки репродукції. Оцінка відповідності репродукції оригіналу робиться візуально або яким-небудь фізичним приладом (наприклад, фотоелектричним колориметром), що імітує властивості ока. Тотожність відчуття кольору двох випромінювань в однакових умовах адаптації спостерігача визначиться відмінністю координат колірності порівнюваних випромінювань на значення, менше порогового приросту цієї координати, і різницею їх яскравості, меншої порогової:

$$x_0 - x_p \leq \Delta x; \quad y_0 - y_p \leq \Delta y; \quad L_0 - L_p \leq \Delta L_{\text{пор}},$$

де x_0 , y_0 і x_p , y_p - координати колірності випромінювань ділянок об'єкта і репродукції, що зіставляються.

$\Delta L_{\text{пор}}$, Δx , Δy - порогові прирости яскравості і координати колірності;

L_0 , L_p - яскравості відповідних ділянок об'єкту і репродукції;

z - постійний коефіцієнт для усіх ділянок репродукції.

Психологічна точність відтворення багатоколірного об'єкту визначається такою його репродукцією, в якій будь-яка зміна кольору якої-небудь її ділянки, що не супроводжується одночасною зміною кольору інших її частин, знижує оцінку якості відтворення.

Введення цього поняття пов'язане з експериментально встановленим фактом існування зображень зі значними відхиленнями від вимог фізіологічної точності, але що сприймаються без помітного зниження оцінки якості відтворення кольору. Ці допустимі відхилення неоднакові за числом колірних і яскравісних порогів від напряму зміни колірності, значущості ділянки репродукції загалом, її ансамбля і інших причин. Так, наприклад, експериментально доведена можливість більшого відхилення колірності будь-якої ділянки репродукції, якщо колірність усіх інших її ділянок змінюється в тому ж напрямі, наприклад при розгляді репродукції через слабовибірковий світлофільтр. Встановлена допустимість великих змін колірності за чистотою, ніж за колірним тоном. Відомо також, що відхилення колірності і яскравості на основних, центральних по композиції ділянках репродукції має бути значно менше, ніж на другорядних ділянках. Наприклад, колір сторінок книги, освітленої помаранчевими променями сонця, що заходить, сприймається білим, не зважаючи на те, що його колориметричні характеристики відповідають помаранчевому кольору. Таке "неправильне" сприйняття кольору відбувається через те, що в променях сонця, що заходить, всі предмети оточуючого нас простору значно жовтіють і червоніють.

Всі ці міркування дозволяють рахувати психологічну оцінку точності найбільш суттєвою. Психологічний критерій дозволяє судити про якість

відтворення багатоколірного об'єкта в цілому, а не по окремих його ділянках. Ці особливості показують, що поняття психологічної точності може застосовуватися до оцінки якості відтворення складних багатоколірних оригіналів.

Для оцінки якості відтворення кольорів спочатку широко використовувався спектрозональний метод. Позитивною стороною цього методу було те, що якість перенесення кольорів безпосередньо ув'язувалася зі спектральним складом джерел світла. Цей зв'язок якісної оцінки з фізичними параметрами джерел світла здійснювався в результаті регламентації розподілу потоку випромінювання за восьми зонами видимої ділянки спектру. Згідно з цим методом перенесення кольорів прийнято вважати таким, що задовольняє вимогам, якщо потік досліджуваного випромінювання джерела світла в кожній зоні відрізняється не більше допустимої межі від потоку еталонного випромінювання в цій же зоні.

Зони спектра для контролю перенесення кольорів.

Зони спектра		1	2	3	4	5	6	7	8
Довжина хвилі, нм	400	420	440	460	510	560	610	660	720

Недоліком спектрального методу є помітний вплив на якість перенесення кольорів розбиття спектра на зони; а також залежність якості перенесення кольорів від розподілу енергії усередині зони, що не враховується регламентацією потоку в зоні (цей факт набуває особливого значення за наявності ліній монохроматичних випромінювань в спектрі джерел світла). Як наслідок, два джерела світла, що задовольняють регламентованому за зонами розподілу енергії, можуть виявитися різними з точки зору якості перенесення кольорів. Якщо в спектрі джерела світла є лінії монохроматичних випромінювань, то регламентація за зонами не може гарантувати однакових змін кольору предметів.

Метод контрольних кольорів (колориметричний метод). В основу цього методу покладений розрахунок середнього значення зміни колірності

спеціально відібраних кольорових зразків з атласу Манселла в рівноконтрастній системі при освітленні їх досліджуванним і стандартним джерелом світла.

Переваги методу:

- метод передбачає безпосередню оцінку кольоровідтворюючих якостей джерела світла за дією на орган зору;
- загальний індекс відтворення кольорів лінійно пов'язаний з середнім числом порогів кольоророзрізнення, тобто з колірним відчуттям;
- метод дає можливість врахувати зміну адаптації органу зору при порівнянні джерел, що мають деяку відмінність в колірності.

Суть методу оцінки відтворення кольорів МКО полягає в наступному. У результаті великого числа досліджень змін кольору різних об'єктів, і в тому числі зразків атласу Манселла, при освітленні їх різними джерелами світла (в першу чергу ЛЛ) і стандартними джерелами світла, було відібрано мінімальну кількість зразків з атласу Манселла, що дозволяють судити про якість відтворення кольору найбільш поширених забарвлених об'єктів. Набір складається з восьми основних і шести додаткових контрольних зразків. Основні вісім зразків мають однакове значення координати (value) в атласі Манселла, що відповідає приблизно однаковому значенню коефіцієнта відбиття (близько 30%). Координати кольору цих зразків при освітленні стандартними джерелами світла А (2854 К) і спектральні коефіцієнти відбиття - табличні значення. Якість відтворення кольорів оцінюється індексами кольоровідтворення, визначуваними розрахунковим шляхом за заданим розподілом по спектру енергії досліджуваного джерела світла. Початковими даними є спектральні коефіцієнти відбиття контрольних зразків. Як еталонне випромінювання, при освітленні яким відтворення кольорів вважається правильним, приймається стандартне джерело, найбільш близьке за колірністю випромінювання до досліджуваного. Для цього виконують розрахунок колірності досліджуваного випромінювання і визначають його колірну температуру.

Як стандартне в методі МКО розглядається випромінювання чорного тіла з температурою, яка дорівнює колірній температурі досліджуваного джерела світла, але не перевищує 5000 К. Якщо колірна температура досліджуваного випромінювання вище 5000 К, то як стандартне, розглядається джерело Д, що відтворює фази денного світла. Необхідна точність індексу перенесення кольорів може бути досягнута, якщо досліджуване і стандартне випромінювання розрізняються по колірності в системі МКО 1960 не більше, ніж на значення $5,4 \cdot 10^{-3}$.

Зміна кольору контрольних зразків при освітленні досліджуваним джерелом світла має бути оцінена в колірних порогах, тому розрахунок їх проводиться в рівноконтрастній системі. Як таковою в методиці МКО використовується система МКО 1964 $U^*V^*W^*$. В цій системі розраховують координати колірного відчуття всіх контрольних зразків при освітленні їх стандартним і досліджуваним джерелом світла з урахуванням відмінностей в колірній адаптації, обумовлених відмінністю T_c джерел світла.

Оскільки колірність досліджуваного джерела світла, як правило, не точно співпадає з колірністю підбраного для порівняння стандартного випромінювання, то відмінність в колірності й спектральних складах порівнюваних джерел світла внесе значну систематичну помилку в розрахунок зміни колірності контрольних зразків, що погіршить розрахункові якісні показники досліджуваного випромінювання.

Облік адаптації виконують розрахунковим шляхом на основі методу коефіцієнтів фон Кріса. В основу цього методу покладена гіпотеза про взаємозв'язок рівнів збудження кольоросприймаючих рецепторів ока з адаптацією, яку можна кількісно виразити і зв'язати з рівнем збудження відповідного рецептора, ініційованого випромінюванням адаптації. При цьому збільшення збудження рецептора за рахунок адаптації веде до зменшення збудження, що виникає за рахунок спостережуваного об'єкту. Вплив адаптації тут аналогічний стомленню, що знижує діапазон реакції рецептора на збуджуючий стимул. Якщо вважати, що рівні збуджень

пропорційні координатам кольору відповідних випромінювань, то математична формалізація гіпотези матиме вигляд:

$$\chi'_{ai} \cdot \chi'_u = \text{const};$$

$$z'_{ai} \cdot z'_u = \text{const};$$

$$c'_{ai} \cdot c'_u = \text{const},$$

де χ'_{ai} , z'_{ai} , c'_{ai} - координати кольору і-го об'єкту при адаптації на досліджуване випромінювання у фізіологічній системі ЧЗС;

χ'_u , z'_u , c'_u - координати кольору досліджуваного випромінювання в системі ЧЗС.

Згідно з гіпотезою ці інваріанти справедливі не тільки для будь-якого об'єкту в полі зору при адаптації на досліджуване випромінювання, але і для різних за кольором випромінювань, що визначають адаптацію. Порівнюючи колір об'єкту при адаптації на досліджуване випромінювання з кольором його при адаптації на стандартне випромінювання, можна записати:

$$\chi'_{ai} = \chi'_{sti} (\chi'_{sti} / \chi'_u);$$

$$z'_{ai} = z'_{sti} (z'_{sti} / z'_u);$$

$$c'_{ai} = c'_{sti} (c'_{sti} / c'_u),$$

де χ'_{sti} , z'_{sti} , c'_{sti} - координати кольору і-го зразка при адаптації на стандартне випромінювання;

χ'_{st} , z'_{st} , c'_{st} - координати кольору стандартного випромінювання.

Ці множники, кольори об'єкту, що дозволяють перейти від координат, при адаптації на одне випромінювання до координат кольору того ж об'єкту при іншій адаптації, називають коефіцієнтами фон Кріса.

Таким чином, для обліку адаптації за допомогою коефіцієнтів фон Кріса необхідно перейти від колориметричної системи МКО 1931 до фізіологічної системи. Як таковою системою в методі оцінки перенесення кольорів використовуються фізіологічна система, запропонована Джаддом. Ввівши поправки на адаптацію за допомогою коефіцієнтів фон Кріса, слід далі знову виробити перерахунок координат кольору в систему МКО 1931 і далі в рівноконтрастну систему МКО 1964.

Провівши перетворення і перейшовши від координат кольору до координат колірності, отримали рівняння для випадку, коли потоки джерел випромінювання стандартного і досліджуваного дорівнюють один одному:

$$U_{\tilde{A}^2} = \frac{10,872 + 0,404\tilde{N}_{\tilde{A}^2}\tilde{N}_{\tilde{N}O} / \tilde{N}_{\tilde{A}} - 4d_{\tilde{A}^2}d_{\tilde{N}O} / d_{\tilde{A}}}{16,518 + 1,481\tilde{N}_{\tilde{A}^2}\tilde{N}_{\tilde{N}O} / \tilde{N}_{\tilde{A}} - d_{\tilde{A}^2}d_{\tilde{N}O} / d_{\tilde{A}}}$$

$$V_{\tilde{A}^2} = \frac{5,52}{16,518 + 1,481\tilde{N}_{\tilde{A}^2}\tilde{N}_{\tilde{N}O} / \tilde{N}_{\tilde{A}} - d_{\tilde{A}^2}d_{\tilde{N}O} / d_{\tilde{A}}},$$

де $u_{\text{ді}}$, $v_{\text{ді}}$ - координати колірності і-го контрольного зразка з урахуванням адаптації, що відповідає умові ($u_{\text{д}} = u_{\text{ст}}$, $v_{\text{ді}} = v_{\text{ст}}$); c і d - коефіцієнти з індексами ді, ст, д, вичислені з урахуванням координат колірності u , v для і-го зразка при освітленні його досліджуваним джерелом світла відповідно за наступними формулами:

$$c = (4 - u - 10v)/v,$$

$$d = (1.708v + 0.404 - 1.481u)/v.$$

Визначення зміни кольору кожного контрольного зразка здійснюють за формулою колірної відмінності МКО. Згідно з цією формулою колірну відмінність можна інтерпретувати в рівноконтрастному просторі МКО 1964 як відстань між двома точками, що характеризують порівнювальні кольори.

Зміна кольору, названа в методі оцінки перенесення кольорів колірним зрушенням, визначається наступним рівнянням:

$$\Delta E_i = \sqrt{(U_{\text{cmi}} - U_{\text{ді}})^2 + (V_{\text{cm}} - V_{\text{ді}})^2 + (W_{\text{cmi}} - W_{\text{ді}})^2}$$

Спеціальний індекс відтворення кольорів R_i для і-го зразка пов'язаний з колірним зрушенням наступною лінійною залежністю:

$$R_i = 100 - 4,6 \cdot \Delta E_i.$$

Значення коефіцієнта 4,6 підібрано з урахуванням умови, щоб середнє значення індексу перенесення кольорів для контрольних зразків, освітлених лампою типу ДРЛ знаходилось в межах 40 - 50. ЛЛ, що мають кращі властивості, що передають колір, мають великі значення індексів.

Дані розрахунку індексу перенесення кольорів округляються до найближчого цілого числа. Оскільки значення ΔE_i дорівнює значенню колірної відмінності, вираженої в колірних порогах, то ледве помітна відмінність у спеціальних індексах перенесення кольорів при множителі, що дорівнює 4,6 відповідає 5 одиницям R_i .

Загальний індекс перенесення кольорів R_a визначається як середнє арифметичне восьми значень спеціальних індексів перенесення кольорів R_i , розрахованих для групи контрольних зразків МКО, що мають номери від 1 до 8, коефіцієнт яскравості яких приблизно однаковий:

$$R_a = 1/8 \sum R_i.$$

Загальний індекс відтворення кольорів для ЛЛ з поліпшеним відтворенням кольорів має найвище значення, яке дорівнює 92-95.

Літературні джерела

1. Мешков В.В. Основы светотехники. Ч. 2./ В.В. Мешков, А.Б. Матвеев. – М.: Энергоатомиздат, 1991, 430 с.
2. Пэдхемм Ч. Восприятие света и цвета /Ч. Пэдхемм, Д. Сондерс.- М.: Мир, 1978.
3. Айзенберг Ю.Б. Справочная книга по светотехнике / Ю.Б. Айзенберг. – М.: Знак, 2005.
4. Брилл Т. Свет. Воздействие на произведения искусства / Т. Брилл. – М.: Мир, 1983.
5. Гуторов М.М. Сборник задач по основам светотехники / М.М. Гуторов.- М.: Энергоатомиздат, 1988. - 128 с.
6. Джадд Д. , Вышецки Г. Цвет в науке и технике / Д. Джадд, Г. Вышецки. М.: Мир, 1978, 592 с.
7. Методичні вказівки до практичних занять і лабораторних робіт, самостійної роботи студентів та виконання курсових і контрольних робіт з дисципліни “Основи світлотехніки” для студентів 2,3 курсів денної і 3,4 курсів заочної форм навчання спец. 6.050701 “Світлотехніка і джерела світла” / С.С. Овчинников, В.М. Поліщук, Г.О. Петченко. – Х.: ХНАМГ, 2010, 86 с.

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Овчинников Станіслав Степанович

Таряник Марія Михайлівна

Лутай Ольга Вікторівна

Конспект лекцій з курсу «**Фізіологічна оптика та колориметрія**»
(для студентів 4 курсу денної і заочної форм навчання за напрямом 0906
(6.050701) “Електротехніка та електротехнології” спеціальності
“Світлотехніка і джерела світла”).

Відповідальний за випуск *Г. О. Петченко*

Редактор *Д. Ф. Курильченко*

Комп’ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2009, поз. 100 Л

Підп. до друку 18.06.2010 р.
Друк на ризографі.
Тираж 50 пр.

Формат 60x84 1/16
Ум. друк. арк. 3,4
Зам. №

Видавець і виготовлювач:
Харківська національна академія міського господарства,
вул. Революції, 12, Харків, 61002
Електронна адреса: rectorat@ksame.kharkov.ua
Свідоцтво суб’єкта видавничої справи:
ДК № 731 від 19.12.2001